



Masterarbeit

Inbetriebnahme und Evaluierung
des Hochleistungsstrahlers Synlight

Daniel Korber

Technology
Arts Sciences
TH Köln



TECHNISCHE HOCHSCHULE KÖLN
COLOGNE INSTITUTE FOR RENEWABLE ENERGY

MASTERARBEIT

von

DANIEL KORBER

MATR. NR. 11088243

Inbetriebnahme und Evaluierung
des Hochleistungsstrahlers Synlight

Commissioning and evaluation
of the high-flux solar simulator Synlight

Referent: Prof. Dr. Volker Nickich
Korreferent: Dr.-Ing. Dmitrij Laaber

Ausgabe: 27.02.2017
Abgabe: 07.08.2017
Registrier-Nr.: MA EGM 18/17

Kurzfassung

Diese Arbeit handelt von der Inbetriebnahme und der Evaluierung des vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelten Hochleistungsstrahlers Synlight. Die erwartete Strahlungsleistung beträgt bis zu 300 kW, womit Synlight in der Entwicklung neuer konzentrierender Solartechnologien eine Brücke zwischen Anlagen im Labormaßstab und großräumiger Solarturm-Forschungsplattformen darstellt. Der Sonnensimulator beschleunigt durch seine uneingeschränkte Verfügbarkeit die Entwicklung solarchemischer Prozesse und Solartechnologien. Die Ermittlung der genauen Strahlungsleistung und Flussdichteverteilung verschafft eine der wichtigsten Einflussgrößen für die Wirkungsgradberechnung der zu untersuchenden Technologien. Die im Rahmen dieser Arbeit angewandte Strahlungsmessmethode wird mit einem hochreflektierenden Target und einer Digitalkamera durchgeführt. Die Kalibrierung der aufgenommenen Flussdichteverteilungen erfolgt mit Hilfe eines Gardon-Radiometers und der Software Flux Mapping Acquisition System (FMAS). Zur Optimierung des Strahlungsleistungspotentials wurden einzelne Messreihen verglichen und anschließend die einzelnen Strahlermodule händisch nachjustiert. Die Strahlungsmessungen bestätigen die Erwartungswerte der Gesamtstrahlungsleistungen und die Peakflussdichten übertreffen den Erwartungswert um bis zu 30 %. Die gemessenen Peakflussdichten und die ermittelten Flussdichteverteilungen werden analysiert und visualisiert.

Stichworte

Synlight - Hochleistungsstrahler - Sonnensimulator - konzentrierende Solartechnik - Strahlungsflussdichte - optische Messung - CCD-Kamera - Radiometer

Abstract

The thesis at hand deals with the commissioning and evaluation of the high-flux solar simulator Synlight developed by the German Aerospace Center (DLR). The expected maximal radiation power of up to 300 kW allows bridging between the laboratory testing and large-scale demonstration facilities in the development of new, concentrated solar technologies. The solar simulator shall accelerate the development of solar processes and components by its unrestricted availability. The determination of the exact radiation power and flux density distribution is one of the most important influencing factors for the efficiency calculation of new technologies. The radiation measurement method used in this work is carried out with a highly reflective target and a digital camera. The Calibration of the recorded flux density distributions is implemented by using a Gardon gauges and the software Flux Mapping Acquisition System (FMAS). Individual measurement series were compared whereupon the individual beam modules were manually adjusted to optimize the radiation power potential. The radiation measurements confirm the expected values of the total radiation output and the peak flux densities exceed the expected value by up to 30 %. The measured peak flux densities and the flux density distributions are analyzed and visualized.

Keywords

Synlight - high-flux solar simulator - concentrated solar power - flux density - measurement - CCD-camera - radiometer

Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei allen bedanken, die durch ihre Unterstützung die Umsetzung dieser Arbeit in vollem Umfang ermöglicht haben. Zunächst bedanke ich mich bei Herrn Dr. Dibowski, der mich im richtigen Moment nach Synlight vermittelt hat. Besonderen Dank widme ich Herrn Dr. Wieghardt für sein Vertrauen, seinen wertvollen Rat und seine Unterstützung während des Projekts. Dem Betreuer meiner Arbeit, Herrn Dr. Laaber, verdanke ich die hervorragende Betreuung, seine Expertise und den stets kollegialen Umgang. Herrn Dohmen verdanke ich meine neuen Erkenntnisse über die praktische Umsetzung eines technischen Projekts. Herrn Feld und Herrn Haasenleder verdanke ich die Umsetzung des mathematischen Modells in der Steuerung der Anlage, wodurch die Positionierung der Strahler deutlich vereinfacht wurde. Herrn Noll verdanke ich seinen Rat und seine wertvolle Mitwirkung bei der Realisierung der Messungen.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	II
TABELLENVERZEICHNIS	V
1 EINLEITUNG	1
1.1 Hochleistungsstrahler Synlight	2
1.2 Aufgaben	5
2 GRUNDLAGEN	8
2.1 Physikalische Grundlagen	8
2.1.1 Schwarzer Körper	8
2.1.2 Sonnenspektrum	9
2.1.3 Das Lambertsche Gesetz	11
2.1.4 Gasentladung	12
2.2 Grundlagen des Hochleistungsstrahlers	13
2.2.1 Xenon-Kurzbogenlampe	13
2.2.2 Elliptischer Konzentrator	16
3 METHODEN	18
3.1 Messverfahren	18
3.1.1 Radiometer	20
3.1.2 Target	24
3.1.3 Strahlerpositionierung	29
3.1.4 Kamera	34
3.1.5 Flux Mapping Acquisition System (FMAS)	37
3.2 Qualitative Leistungsmessung mit FMAS	39
3.3 Auswertungsmethoden	41
4 ERGEBNISSE	43
4.1 Vorgegangene Messungen	43
4.2 Stichprobenartige Messung in Versuchsraum 3	45
4.3 Nachjustierung der montierten Strahler	47
4.4 Auswertung der nachjustierten Strahler	50
4.5 Strahlergruppierungen	55

4.6	Hauptmessungen	57
5	FAZIT UND AUSBLICK	60
A	ANHANG: BILDER DES STRAHLERS	61
B	ANHANG: MESSREIHEN	63
C	ANHANG: KALIBRIERUNGSZERTIFIKATE	70
D	ANHANG: MATLAB-SKRIPTe	74

Abbildungsverzeichnis

1.1	DLR-Hochleistungsstrahler in Köln Porz.	2
1.2	Grundriss der Versuchsräume 1, 2 und 3.	3
1.3	Synlight während der Bauarbeiten am 09.12.2016.	4
1.4	Aufnahme des fertigen Strahlers während der Bestrahlung eines Testreaktors.	5
2.1	Spektrale Verteilung der Schwarzkörperstrahlungsintensität bei unterschiedlichen Temperaturen.	8
2.2	Das Solarspektrum außerhalb und innerhalb der Erdatmosphäre im Vergleich zum Schwarzkörperspektrum bei 5.778 K.	10
2.3	Xenon-Kurzbogenlampe in Betrieb.	14
2.4	Spektrum einer Xenon-Kurzbogenlampe im Vergleich zum Schwarz- körperspektrum bei 6.200 K.	15
2.5	Prinzip des elliptischen Konzentrators.	17
3.1	Versuchsaufbau der angewandten indirekten Messmethode, um die Flussdichteverteilung der Strahler zu bestimmen.	18
3.2	Grundprinzip des Gardon-Radiometers.	21
3.3	Grundprinzip des Kendall-Radiometers.	22
3.4	Technische Zeichnung der Baugruppe: Transparente Vorderan- sicht des 2 x 2 m Targets mit parallel angelegten Wasserkanälen, zwei Eingängen (unten) und einem Ausgang (oben).	27

3.5	Rohrsystem für die Wasserversorgung des Targets und des Radiometers.	28
3.6	Vorder- und Rückseite des fertigen Targets.	29
3.7	Zwei benachbarte, auf einem Punkt fokussierte Strahler und der Radius r zwischen dem Fokus und dem Mittelpunkt der Drehachsen des Strahlermoduls.	30
3.8	Vorderansicht des Strahlers mit dem Koordinatensystem x - y - z , dem Koordinatenursprung in G6 und den jeweiligen Abständen a_y und a_z	31
3.9	x - y -Ebene der kugelförmigen Struktur ausgehend von einem um f_y verschobenen Fokus.	32
3.10	Räumliche Darstellung der kugelförmigen Struktur mit einigen projizierten Abständen und Flächen.	33
3.11	Prinzipieller Aufbau eines MOS-Kondensators.	35
3.12	Monochrome Quanteneffizienz des CCD-Sensors vom Typ KAI-1020.	37
4.1	Vorangegangene Flussdichtemessung der einzelnen Strahler vor der Montage der Reflektoren.	43
4.2	Histogramm und Normalverteilung der 149 vorangegangenen Flussdichtemessungen vor der Montage der Reflektoren.	44
4.3	Ergebnisse der 25 stichprobenartig gewählten Strahler bei der Erstevaluierung am 08.05.2017.	45
4.4	Histogramm und Normalverteilung der Flussdichten von 25 Stichproben bei der Justierung und bei der Erstevaluierung.	46
4.5	Nachfokussierung aller Strahler im laufenden Betrieb.	48
4.6	Flussdichteverteilung vom Strahler H1 nach der Montage und nach der zweiten Justierung.	49
4.7	Überblick über alle nachjustierten Strahler am 23.06.2017.	50
4.8	Histogramm und Normalverteilung der 149 Flussdichten nach der Nachjustierung.	51
4.9	Histogramm und Normalverteilung der Flussdichten von 25 Stichproben bei der Erstevaluierung und bei der Nachjustierung.	52
4.10	Nachjustierte Flussdichten in Bezug auf den Einfallswinkel zur Flächennormalen.	53

4.11	Schnittdarstellung des Targets mit dem Radiometer und den im jeweiligen Strahlengang projizierten Flächen A1, A2 und A3. . . .	54
4.12	Flussdichte der 117 Strahler.	55
4.13	Flussdichteverteilung von 33 äußeren Strahlern.	56
4.14	Flussdichteverteilung von 116 Strahlern.	58
A.1	Das Synlight-Gebäude.	61
A.2	Kugelförmige Struktur der 121 im Versuchsraum 2 ausgerichteten Strahlermodule.	62
A.3	Bestrahlung des Targets im Versuchsraum 2, während der Nachjustierarbeiten mit einer Hebebühne.	62
B.1	Messreihen der fünf Gruppierungen für die Ermittlung der Hauptpeakflussdichte.	69
C.1	Kalibrierungszertifikat des Radiometers 10191.	71
C.2	Kalibrierungszertifikat des Radiometers 10192.	72
C.3	Kalibrierungszertifikat des Radiometers 10193.	73

Tabellenverzeichnis

1.1	Technische Eigenschaften von Synlight und erwartetes Strahlungspotential.	3
2.1	Wellenlängen verschiedener Farbtöne.	10
3.1	Eingesetzte Thermogage Circular-Foil Heat Flux Transducer. . . .	23
4.1	Absolute Häufigkeit der 149 vorangegangenen Flussdichtemessungen vor der Montage der Reflektoren.	44
4.2	Absolute Häufigkeit der 149 Flussdichten nach der Nachjustierung.	51
4.3	Zerlegung der Hauptgruppierung in fünf Gruppierungen.	57
4.4	Ermittlung der Hauptflussdichte.	58
4.5	Hauptmessungen.	59
B.1	Messreihen A bis C.	64
B.2	Messreihen D bis F.	65
B.3	Messreihen G bis I.	66
B.4	Messreihen J bis L.	67
B.5	Messreihen M.	68
B.6	Stichprobenartige Erstevaluierung im Versuchsraum 3.	68

Abkürzungsverzeichnis

AM Air Mass

ASTM American Society for Testing and Materials

CCD Charge-Coupled Device

CSV Comma-Separated Values

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

FMAS Flux Mapping Acquisition System

MOS Metall Oxide Semiconductor

ND Neutraldichtefilter

OFHC Oxygen-free High Conductivity

Nomenklatur

Symbol	Bezeichnung	Einheit
P	Strahlungsleistung	W
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
A	Fläche	m^2
T	Temperatur	K
E	Energie	J
m	Masse	kg
c	Lichtgeschwindigkeit	m/s^2
λ	Wellenlänge	nm
I	Strahlungsstärke	W sr^{-1}
L	Strahldichte	$\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$
a_y, a_z	Abstand zwischen zwei benachbarten Strahlern	m
s_y, s_z	Position des betrachteten Strahlers in y und z	m
f_y, f_z	Verschiebung des Fokus in y und z	m
r	Abstand zwischen dem Fokus und den Drehachsen	m
h	Abstand in x zwischen Drehachsen und Fokus	m
r'	Abstand in z zwischen Drehachsen und Fokus	m
ϕ, ϵ	Azimet- und, Elevationswinkel	°
β	Winkel zur Flächennormalen	°
τ	Transmissionsgrad	-
x	Neutraldichte	-
μ	Erwartungswert	kW/m^2
σ	Standardabweichung	kW/m^2
A_1 bis N	Messreihe von 1 bis N	kW/m^2
N	Anzahl an Messwerten	-
i	Zähler	-
A1, A2, A3	Im Strahlengang projizierte Flächen	m^2

1 Einleitung

Die Erprobung konzentrierender Solartechnologien und solarchemischer Prozesse erfordert eine gleichmäßige Steigerung der eingesetzten Strahlungsleistung, um einen sicheren Entwicklungsverlauf zu gewährleisten. Zusätzlich ist die wissenschaftliche Untersuchung bei der Nutzung natürlicher Sonnenstrahlung aufgrund der zeitlich unflexiblen und wetterabhängigen Verfügbarkeit besonders schwierig. Neue Technologien müssen vor einer endgültigen Prüfung in Solarturm-Forschungsplattformen unter kontrollierten Laborbedingungen mit vergleichbaren Strahlungsleistungen untersucht werden. Abgesehen von den natürlichen Wettereinflüssen, haben Solarturm-Forschungsplattformen durch die relativ hohen Brennweiten eine negative Auswirkung auf die Präzision und damit verbunden auf die maximale Flussdichte der konzentrierten Strahlung. Die wesentlich höheren Peakflussdichten elektrischer Sonnensimulatoren ergänzen und erweitern somit die Anwendungsbereiche der konzentrierenden Solartechnik [1].

Elektrische Hochleistungsstrahler ermöglichen sehr präzise, gleichbleibende und kontrollierte Strahlungsflüsse mit einem besonders sonnenähnlichen Strahlungsspektrum. Aufgrund der uneingeschränkten Verfügbarkeit beschleunigen Sonnensimulatoren die technologische Entwicklung der konzentrierenden Solartechnologien und vereinfachen den Entwicklungsverlauf der jeweiligen Forschungsgebiete. Der Hochleistungsstrahler des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR) in Köln Porz (siehe Abbildung 1.1) verfügt über eine Strahlungsleistung von etwa 25 kW mit einer Brennweite von 3 m und ermöglicht seit 2007 eine einzigartige Bandbreite an Dauerversuchen unter sehr stabilen Strahlungsbedingungen [1, 2]. Versuche mit einer höheren Strahlungsleistung als die des Hochleistungsstrahlers in Köln Porz können nur in Solarturm-Forschungsplattformen durchgeführt werden, die eine wesentlich höhere Strahlungsleistung von bis zu 10 MW erreichen. Um die gleichmäßige Skalierung der Strahlungsleistung während der Erprobung eines Prototyps zu ermöglichen, musste ein einzigartiger Sonnensimulator wie Synlight entwickelt werden. Auf diese Weise wird zukünftig der Entwicklungsverlauf der konzentrierenden Solartechnologien normalisiert.



Abbildung 1.1. DLR-Hochleistungsstrahler in Köln Porz [3].

1.1 Hochleistungsstrahler Synlight

Nach dreijähriger Entwicklungsarbeit wurde der elektrische Hochleistungsstrahler Anfang 2017 fertiggestellt und in Betrieb genommen. Synlight ist die aktuell größte „künstliche Sonne“ der Welt und schafft eine Brücke zwischen Anlagen im Labormaßstab wie die in Köln Porz und Solarturm-Forschungsplattformen [1].

Die wichtigsten Kenndaten der Anlage sind in Tabelle 1.1 aufgeführt. Synlight besteht aus 149 Xenon-Kurzbogenlampen mit einer jeweiligen elektrischen Leistung von 7 kW_{el} und verfügt über drei nebeneinanderliegende Versuchsräume, die parallel verwendet werden können. Die Brennweite der elliptisch geformten Strahler beträgt 8 m. Die erwartete Maximalstrahlungsleistung im Versuchsraum 2 liegt bei 300 kW und in den Versuchsräumen 1 und 3 bei 240 kW, ausgegangen von einer durchschnittlichen Strahlungsleistung von etwa 2,5 kW pro Strahlermodul. Die maximal einsetzbare Modulanzahl in den jeweiligen Versuchsräumen resultiert hauptsächlich aus der geometrischen Anordnung, wie der Grundriss in Abbildung 1.2 zeigt.

Tabelle 1.1. Technische Eigenschaften und erwartetes Strahlungspotential [1].

Anzahl der Strahler	149
Leistung der Xenon-Kurzbogenlampen	7 kW _{el}
Maximale elektrische Leistung	1 MW _{el}
Brennweite	8 m

Erwartete maximale Strahlungsleistung:

Versuchsraum 2	300 kW
Versuchsraum 1 und 3	240 kW
Peakflussdichte	11.000 kW/m ²

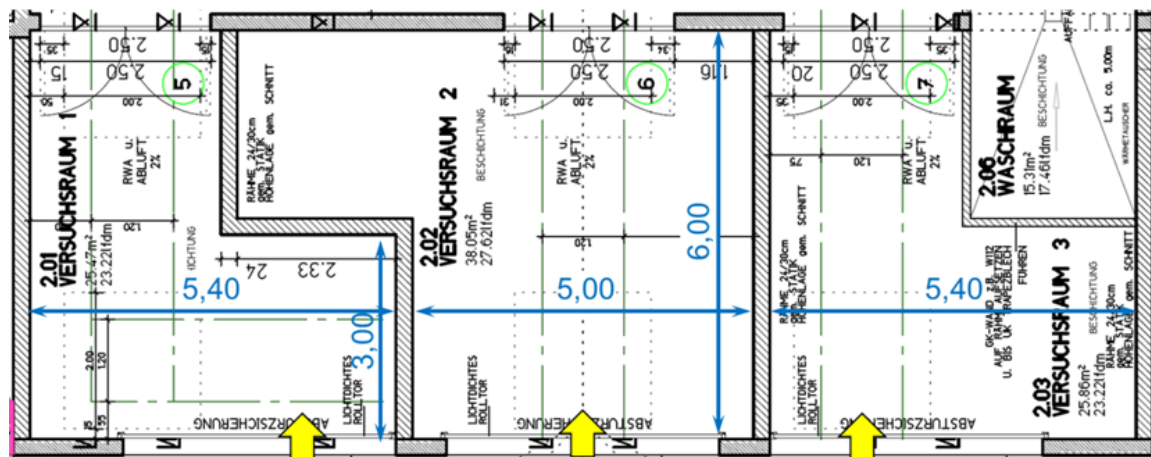


Abbildung 1.2. Grundriss der Versuchsräume 1, 2 und 3 [1].

Die Strahlermodule sind axial verschiebbar und können um die vertikale und die horizontale Achse gedreht werden. Die Bewegung erfolgt über drei elektrische Schrittmotoren und kann mit Hilfe eines Rechners und einer Überwachungsanlage während einer Bestrahlung ferngesteuert werden [1].

Abbildung 1.3 zeigt die Grundstruktur des Strahlers während der Bauarbeiten. Hinter den Strahlermodulen ist jeweils die elektronische Stromversorgung der Xenon-Kurzbogenlampen angebracht, die einen Leistungsbereich zwischen 3,6 und 10 kW mit einem Wirkungsgrad von 90 % unterstützt. Der wechselstromseitige Spannungseingang liegt zwischen 360 und 460 V und der gleichstromseitige Spannungsausgang zwischen 30 und 58 V bei einer einstellbaren Stromstärke von 80 bis 210 A. Die Zündung des Lichtbogens erfolgt bei circa 40 kV [4].

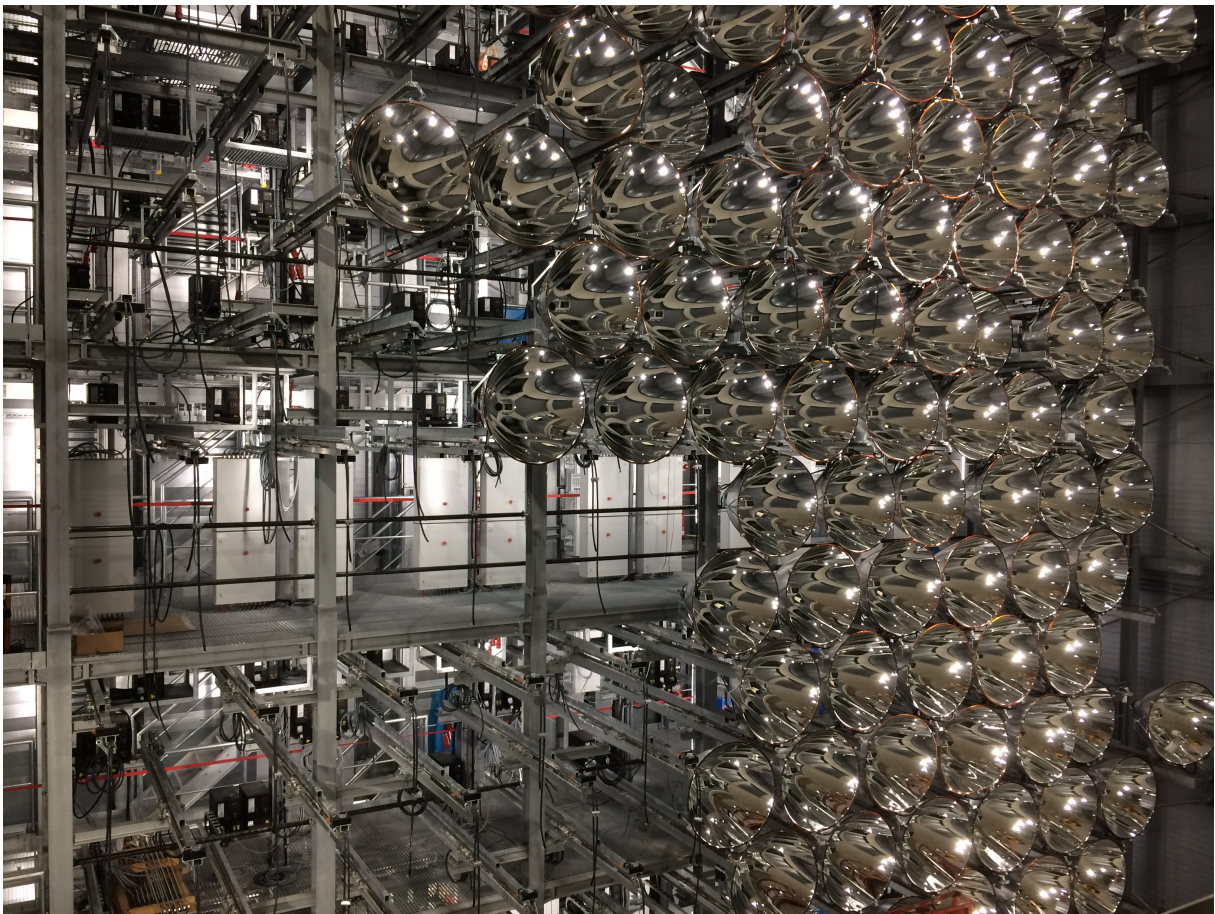


Abbildung 1.3. Synlight während der Bauarbeiten am 09.12.2016.

Die Reflektoren bestehen aus Aluminium. Durch die Reflektorbeschichtung wird ein Reflexionsgrad von mindestens 90 % und eine Streuung von weniger als 10 % mit einer Oberflächenrauheit von $0,1 \mu\text{m}$ erreicht. Die eingesetzten Xenon-Kurzbogenlampen haben aktuell eine elektrische Leistung von 7 kW_{el} und können durch Lampen mit einer elektrischen Leistung von bis zu $10 \text{ kW}_{\text{el}}$ ersetzt werden. Die Strahler bei Synlight werden über einen drehzahlgesteuerten Axiallüfter mit einem Volumenstrom von bis zu $600 \text{ m}^3/\text{h}$ abgekühlt. Ab einer elektrischen Leistung über $10 \text{ kW}_{\text{el}}$ ist eine Wasserkühlung der Lampen erforderlich.

Abbildung 1.4 zeigt einen der ersten Versuche, die im Rahmen der Inbetriebnahme gefahren wurde. Der bestrahlte Testreaktor sollte Erfahrungswerte für einen späteren Bestrahlungsversuch mit einem Wasserstoffreaktor liefern. Die Wasserstofferzeugung erfolgt mittels thermochemischer Redox-Prozesse unter dem Einsatz von porösen Metalloxiden, Wasserdampf und zwei Temperaturniveaus

von 800 und 1.400 °C, die mit Hilfe konzentrierender Sonnenstrahlung erreicht werden können [5].



Abbildung 1.4. Aufnahme des fertigen Strahlers während der Bestrahlung eines Testreaktors.

1.2 Aufgaben

Im Rahmen dieser Arbeit werden für die Evaluierung des gesamten Strahlers folgende Aufgaben bearbeitet:

- Entwurf und Konstruktion einer hochreflektierenden Bestrahlungsfläche (Target) für ein indirektes Messverfahren mit einer Digitalkamera, einem Messrechner und einem Radiometer.
- Entwurf eines mathematischen Modells zur genauen Ausrichtung der Strahlermodule auf einem beliebig gewählten Punkt im Raum.
- Peakflussdichte-, Leistungsmessung und Auswertung der einzelnen Strahler, verschiedener Strahlergruppierungen sowie eine Hauptmessung mit 121 im zweiten Versuchsraum ausgerichteten Strahlermodulen.

Entwurf eines Targets

Die wissenschaftliche Untersuchung einer angestrahlten Apertur erfordert eine hochgenaue Messung des Strahlengangs. Die naheliegendste Methode bei Synlight ist eine indirekte Messung mit einer Kamera und einem Target. Für diese Art der Messung wird eine diffusreflektierende Oberfläche bestrahlt und die dabei entstehende Helligkeitsverteilung mit einer digitalen Kamera aufgenommen. Die Helligkeitsunterschiede können mit Hilfe eines Computers abstrahiert und mit einem Gardon-Radiometer kalibriert werden. Diese weit verbreitete Methode ermöglicht eine schnelle Messung mit einer räumlich sehr hohen Auflösung. Zusätzlich verfügen alle eingesetzten Komponenten über eine relativ geringe Schadensanfälligkeit [6]. Speziell für Synlight muss ein Target nach folgenden Anforderungen maßgeschneidert werden:

- Die Bestrahlungsfläche muss Peakflussdichten von bis zu 11.000 kW/m^2 und Strahlungsleistungen von circa 300 kW aushalten.
- Die Bestrahlungsfläche soll mindestens $2 \times 2 \text{ m}$ betragen.
- Das Target muss in allen drei Versuchsräumen eingesetzt werden können.

Mathematisches Modell zur Strahlerpositionierung

Die 149 Strahlermodule müssen beliebig gewählte Ziele mit einem Abstand von 8 m anvisieren. Abweichungen des Abstands zwischen Brennpunkt und Fokus führen zur Abschwächung des gebündelten Strahls und damit zur Absenkung des möglichen Leistungspotentials. Da eine individuelle Ausrichtung der jeweiligen Strahler aus Zeitgründen nicht praktikabel ist, wird mittels eines mathematischen Modells versucht, die theoretische Position der Strahler zu berechnen. Die anschließende Positionierung der Strahler kann mit Hilfe dreier Laser pro Strahlermodul und eines Entfernungsmessgeräts geprüft werden. Basierend auf den Berechnungen werden andere Projektgruppen eine zukünftige Implementierung des Modells in die Steuerung der Anlage umsetzen können.

Flussdichte-, Leistungsmessung und Auswertung

Vor der Montage wurden alle Strahler mit der oben beschriebenen indirekten Messmethode mittels eines kleinen Targets und einer digitalen Kamera im laufenden Betrieb fokussiert und anschließend die jeweilige Flussdichte und Strahlungsleistung gemessen. Diese vorangegangenen Messungen werden nach der Fertigstellung der Anlage mit neuen Messungen der Strahler verglichen und beurteilt. Danach werden komplette Strahlergruppierungen evaluiert und anschließend soll eine Hauptmessung mit 121 Strahlermodulen im zweiten Versuchsraum stattfinden. Vor der Hauptmessung müssen alle Mechanismen, wie die Strahlermodule, die Ausrichtung, das Target und das Überwachungssystem, einwandfrei funktionieren.

2 Grundlagen

2.1 Physikalische Grundlagen

2.1.1 Schwarzer Körper

Ein schwarzer Körper ist eine idealisierte thermische Strahlungsquelle, die die einfallende elektromagnetische Strahlung vollständig absorbiert. Schwarze Körper haben das höchstmögliche Absorptionsvermögen von 100 % und folglich, gemäß dem Kirchhoffschen Strahlungsgesetz, die maximal mögliche thermische Strahlungsleistungsemission bei einer bestimmten Temperatur (siehe Abbildung 2.1).

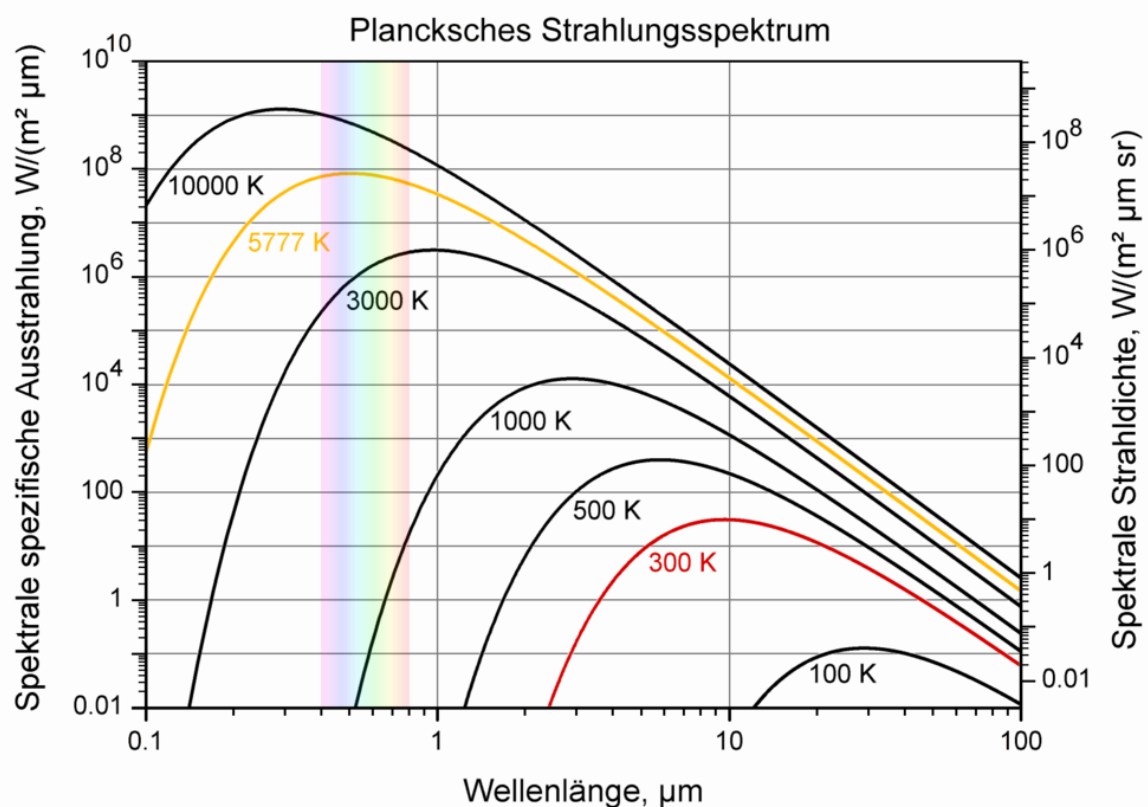


Abbildung 2.1. Spektrale Verteilung der Schwarzkörperstrahlungsintensität bei unterschiedlichen Temperaturen [7].

Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz folgt aus dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik und besagt, dass für einen beliebigen Wärmestrahler im thermischen Gleichgewicht das Verhältnis von Emissions- zu Absorptionsvermögen bei gegebener Wellenlänge und Temperatur konstant ist. Mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes, Gleichung 2.1.1, wird die thermische Strahlungsleistung P eines schwarzen Körpers der Fläche A bei einer Temperatur T berechnet. σ ist die Stefan-Boltzmann-Konstante [8, 9].

$$P = \sigma * A * T^4 \quad \text{mit} \quad \sigma = 5,670367 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4} \quad (2.1.1)$$

2.1.2 Sonnenspektrum

Die Sonne ist ein mittelgroßer Stern der Spektralklasse G. Die Spektralklasse ergibt sich aus der Masse des Himmelskörpers und zeichnet sich durch die Farbtemperatur des Sterns aus. Die Sonne strahlt etwa seit 5 Milliarden Jahren mit ihrer jetzigen Helligkeit, ihre weitere Lebensdauer wird auf annähernd dieselbe Zeit geschätzt [10].

Die Sonne besteht zu etwa 80 % aus Wasserstoff und zu 20 % aus Helium. 0,1 % der Sonne beinhalten andere Elemente. Die Strahlungsleistung folgt aus Kernfusionsprozessen. Dabei werden hauptsächlich über verschiedene Zwischenreaktionen vier Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern verschmolzen. Die Gesamtmasse aller nach der Fusion entstehenden Teilchen ist geringer als die der vor der Reaktion beteiligten Teilchen. Bei diesem sogenannten Massendefekt handelt es sich um freigesetzte Bindungsenergie, die in der Summe pro Sekunde ca. $3,8 \cdot 10^{26}$ Ws beträgt. Insgesamt wird die Sonne um 4,3 Millionen Tonnen pro Sekunde leichter und daraus ergibt sich eine Strahlungsleistung von $3,835 \cdot 10^{26}$ W nach der Äquivalenz von Masse und Energie

$$E = m * c^2 \quad \text{mit} \quad c = 299.792.458 \text{ m/s}, \quad (2.1.2)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist [11]. Wird eine Sonnenoberfläche von $6,081 \cdot 10^{12} \text{ km}^2$ angenommen, ergibt sich eine spezifische Ausstrahlung von $63,3 \text{ MW/m}^2$. Anhand des Stefan-Boltzmann-Gesetzes, Gleichung 2.1.1, errechnet

sich daraus eine Oberflächentemperatur von etwa 5.777 K. Mittels der Strahlungsleistung und des mittleren Abstands vom Erd- zum Sonnenmittelpunkt wird die extraterrestrische Bestrahlungsstärke der Erde von ca. 1367 W/m^2 bestimmt [12]. Die Sonnenstrahlung überträgt sich durch Photonen verschiedener Wellenlänge λ . Tabelle 2.1 zeigt die Farbtöne des Sonnenspektrums und Abbildung 2.2 die jeweilige Bestrahlungsstärke über die Wellenlänge.

Tabelle 2.1. Wellenlängen verschiedener Farbtöne [12].

Farbton	Wellenlänge in nm	Farbton	Wellenlänge in nm
Ultraviolett	<380	Gelbgrün	560 ... 570
Purpurblau (Violett)	380 ... 450	Grünlichgelb	570 ... 575
Blau	450 ... 482	Gelb	575 ... 580
Grünlichblau	482 ... 487	Gelblichorange	580 ... 585
Cyan (Blaugrün)	487 ... 492	Orange	585 ... 595
Bläulichgrün	492 ... 497	Rötlichorange	595 ... 620
Grün	497 ... 530	Rot	620 ... 780
Gelbgrün	530 ... 560	Infrarot	>780

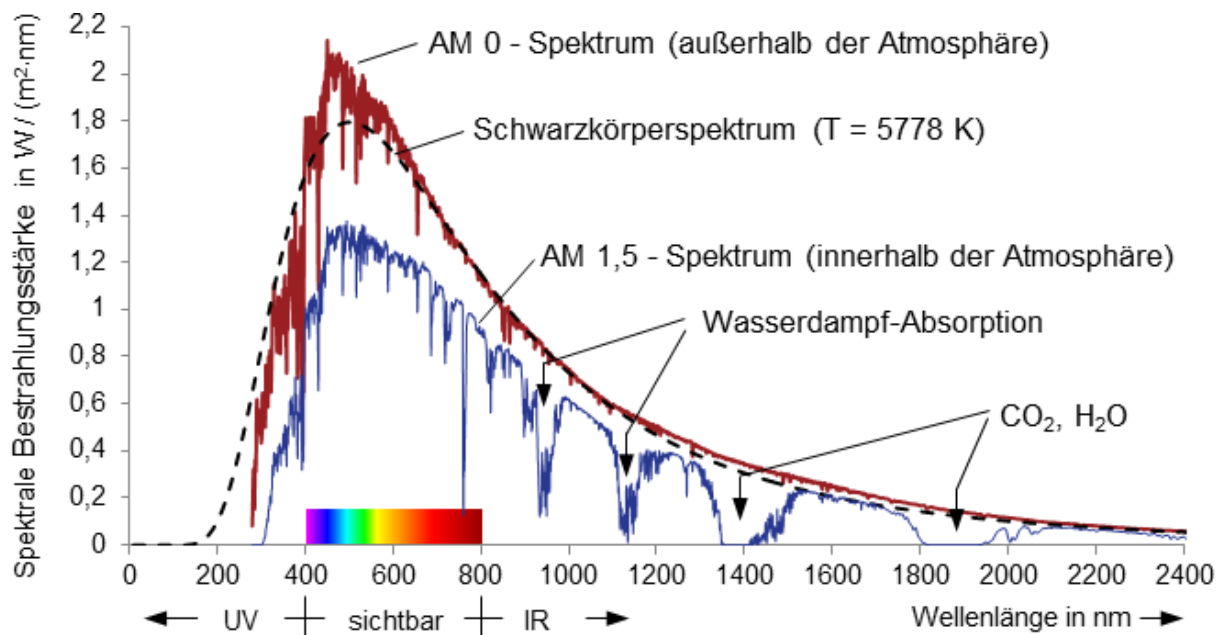


Abbildung 2.2. Das Solarspektrum außerhalb und innerhalb der Erdatmosphäre im Vergleich zum Schwarzkörperspektrum bei 5.778 K [13].

Das gesamte elektromagnetische Spektrum streckt sich zwischen Niederfrequenzen mit einer Wellenlänge von bis zu 100.000 km und Gammastrahlen mit

Wellenlängen im Bereich von weniger als 10 pm. Im Vergleich dazu liegt 99,9 % der Sonnenenergie zwischen 0,217 μm und 10,94 μm [14]. Dabei sind 7 % der Bestrahlungsstärke ultraviolette Strahlung, 47 % sichtbares Licht und 46 % infrarote Strahlung. Abbildung 2.2 zeigt das dabei entstehende Lichtspektrum im Vergleich zu einem Schwarzkörperspektrum bei einer Temperatur von 5.778 K. Innerhalb der Erdatmosphäre wird die Bestrahlungsstärke durch folgende Einwirkungen reduziert:

- Reflexion an der Erdatmosphäre,
- Absorption durch O_3 , H_2O , O_2 und CO_2 ,
- Rayleigh-Streuung und
- Mie-Streuung.

Die Strahlungsabsorption in der Atmosphäre erfolgt hauptsächlich durch Ozon, Wasserdampf, Sauerstoff und Kohlendioxid, wobei der Energieinhalt der absorbierten Photonen sehr selektiv ist. Reduktion durch Rayleigh-Streuung gelingt nur molekularen Bestandteilen, die einen kleineren Durchmesser als die jeweiligen Wellenlängen des Lichts haben. Mie-Streuung wird von Staubteilchen und Verunreinigungen der Luft verursacht, bei denen der Durchmesser größer als die jeweiligen Wellenlängen ist. Zusätzlich ergibt sich eine Verstärkung der reduzierten Bestrahlungsstärke bei niedrigen Sonnenhöhen, da der Weg des Lichts innerhalb der Atmosphäre verlängert wird. Diese Kenngröße heißt Air Mass (AM) und erreicht einen Wert von 1 bei einem senkrechten Sonnenstand. Abbildung 2.2 zeigt im Vergleich zum schwarzen Strahler bei Sonnenoberflächentemperatur das tatsächlich gemessene Spektrum im Weltall und das Spektrum nach eineinhalb Atmosphären, was einer Sonnenhöhe von circa 42° entspricht [12].

2.1.3 Das Lambertsche Gesetz

Das Lambertsche Gesetz beschreibt ein perspektivischer Effekt, bei dem die Strahlungsstärke auf einem ebenen Flächenelement abnimmt, wenn der Winkel

zur Normalen ansteigt. Das Lambertsche Gesetz kann nur angewendet werden, wenn die Strahldichte auf der betrachteten Fläche konstant bleibt. Die ideal reflektierte Strahldichte einer Lambertschen Fläche ist unabhängig von der Betrachtungsrichtung und eine ideal absorbierende Fläche entspricht einem schwarzen Körper, auch Lambert-Strahler genannt. Wird der Winkel θ zur Flächennormale eines Flächenelements A betrachtet, ist die auf der Fläche einfallende Strahlungsstärke $I(\theta)$ proportional zum Produkt aus dem Kosinus des Winkels und der Fläche.

$$I(\theta) \sim A \cos \theta \Rightarrow \frac{I(\theta)}{A \cos \theta} = L \quad (2.1.3)$$

Die Strahlungsstärke dividiert durch das um $\cos \theta$ verkleinerte Flächenelement ergibt die konstante Strahldichte L der Lambertschen Fläche [15].

In der Realität gibt es kein Material, das diese Gesetze vollständig erfüllt. Beispielsweise gilt die richtungsabhängige Strahldichte einer hochreflektierenden Oberfläche nur für relativ kleine Einfallswinkel der Strahlungsdichte.

2.1.4 Gasentladung

Gasentladung bezeichnet den Durchgang eines elektrischen Stroms durch ein ionisiertes Gas. Gase bestehen in der Regel aus elektrisch neutralen Atomen oder Molekülen, wodurch die Leitungsfähigkeit signifikant beeinträchtigt ist. Eine Gasentladung erzeugt mittels Stoßionisation eine hinreichende Menge an Ladungsträgern, die den Stromfluss durch das Gas ermöglichen. Bei der Stoßionisation werden Atome oder Moleküle durch schnelle Elektronen ionisiert. Dabei muss die Energie der Elektronen mindestens so hoch wie die Ionisierungsenergie der Atome oder Moleküle sein. Die Bezeichnung bezieht sich auf jede Ionisation, die durch einen Stoßvorgang erfolgt. Auch die Entstehung von Ladungsträgerpaaren aufgrund einfallender Photonen bei Halbleitern kann als Stoßionisation bezeichnet werden. Durch anschließende Rekombination werden Photonen mit dem entsprechenden Energieinhalt emittiert. Wird im Schnitt

mehr als ein Ionisationsvorgang bewirkt, bevor die Ladungsträger rekombinieren, kommt es zu einem Lawineneffekt. Ein Lawineneffekt kann erst hervorgerufen werden, wenn nach der Stoßionisation der Energieinhalt der angeregten Ladungsträger genügt, um weitere Atome oder Moleküle vor der Rekombination zu ionisieren. Auf diese Weise kann ein einziger Ladungsträger weitere Stoßionisationen bewirken.

Dieses Phänomen wird in der Praxis durch Gas gefüllte gläserne oder metallische Gefäße erzeugt, die zwei Metallelektroden mit einer anliegenden Spannung enthalten. Die Ionisation der Gasmoleküle wird durch eine Zündung der Gasentladung bewirkt. Beispielsweise wird die Zündung und die Aufrechterhaltung des Lichtbogens bei einer Gasentladungslampe mit einem niedrigen Abstand zwischen den Elektroden und einem sehr hohen Druck geschaffen, um eine hinreichend hohe Teilchenkonzentration zu gewährleisten. Bei Xenon-Gasentladungslampen erfolgt die Zündung erst bei mehreren Tausend Volt, da die Ladungsträger nach einem Zusammenprall mit benachbarten Teilchen die Ionisierungsenergie vollständig überwinden müssen. Nach der Zündung kann der Lichtbogen mit einer relativ niedrigen Spannung aufrecht erhalten werden [16].

2.2 Grundlagen des Hochleistungsstrahlers

2.2.1 Xenon-Kurzbogenlampe

Die Lichtausbeute und Farbwiedergabe der Quecksilberentladungslampen mit Zusätzen von Metallhalogenen hat sich über die Jahre stark verbessert. Allerdings zeichnen sich Xenon-Kurzbogenlampen weiterhin durch höchste Flussdichten und gute Farbwiedergabe aus. Diese Eigenschaften sind bei Großprojektionsanlagen, Sonnensimulatoren und in der Automobilindustrie besonders begehrt und in Zukunft wird sogar eine Leistungssteigerung der Lampen gefordert [17].

Xenon-Kurzbogenlampen (Abbildung 2.3) bestehen grundsätzlich aus zwei massiven Wolfram-Elektroden, die von einem dickwandigen und mit Xenon gefüllten Quarzglaskolben umgeben sind. Die links im Bild zu sehende Kathode ist die kleinere Elektrode, die auf die zylindrische Anode gerichtet ist. Die Anode ist verhältnismäßig größer und robuster aufgebaut, um dem Elektronenbeschuss während des Betriebs der Lampe standzuhalten. Die von der Anode absorbierten und energiereichen Elektronen erzeugen thermische Energie, die zum größten Teil in Form von Strahlung abgegeben wird. Die thermische Energie muss effektiv abgeführt werden, um die Temperatur der Anode so niedrig wie möglich zu halten und damit die Lebensdauer der Lampe zu erhöhen. Die spitze Gestalt der Kathode dagegen fördert einen besonders stabilen und scharfen Lichtbogen. Die Kathode projiziert die emittierten Elektronen von ihrer Spitze aus, so dass an der Spitze die hellste Stelle mit der größten Leuchtdichte des Lichtbogens entsteht. Da die Lichtintensität des Lichtbogens mit dem Abstand zur Anode stark abnimmt, wird ein Lichtzentrum von nur wenigen Millimetern Ausdehnung benötigt, um verhältnismäßig hohe Helligkeiten zu erlangen [18, 19].

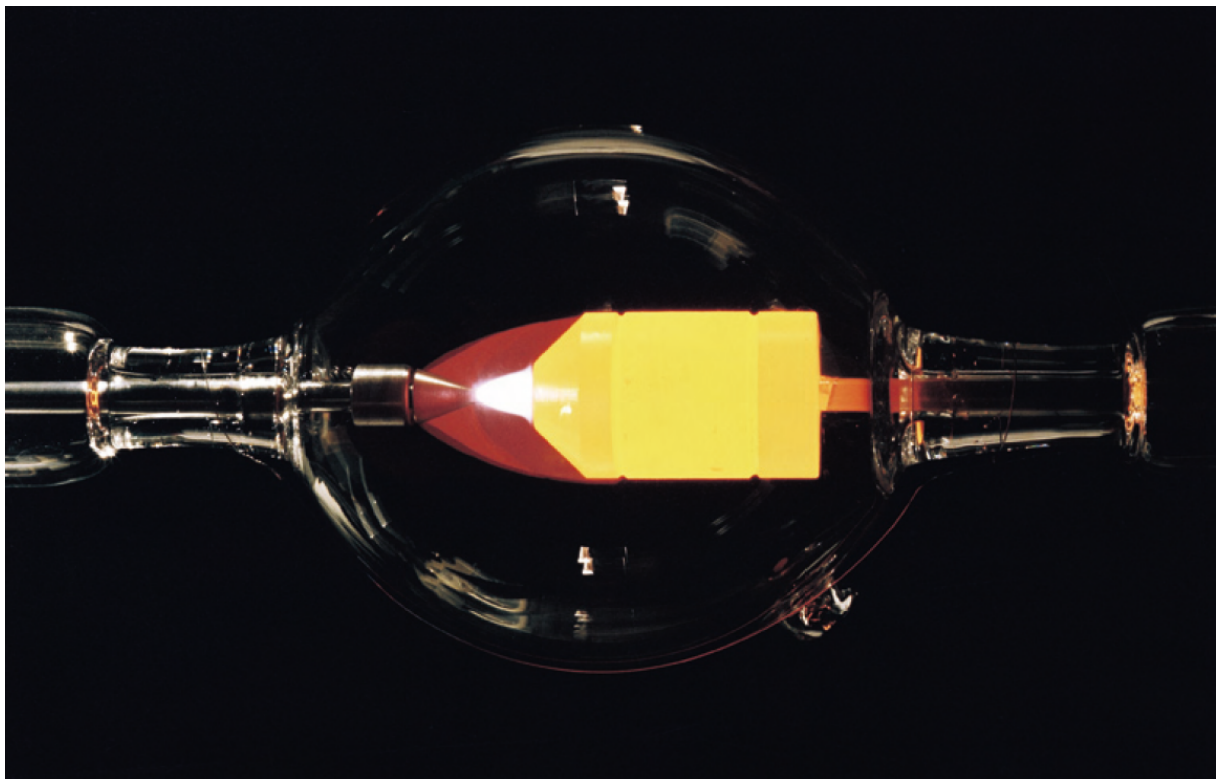


Abbildung 2.3. Xenon-Kurzbogenlampe in Betrieb [19].

Abgesehen von der besonders hohen Helligkeit verfügen Xenon-Kurzbogenlampen über ein sonnenähnliches Spektrum insbesondere im sichtbaren Bereich zwischen 380 und 780 nm, wie das Diagramm in Abbildung 2.4 zeigt. Die Farbwiedergabe der Xenon-Kurzbogenlampe entspricht in etwa dem Spektrum eines schwarzen Körpers mit einer Temperatur von 6.200 K [19].

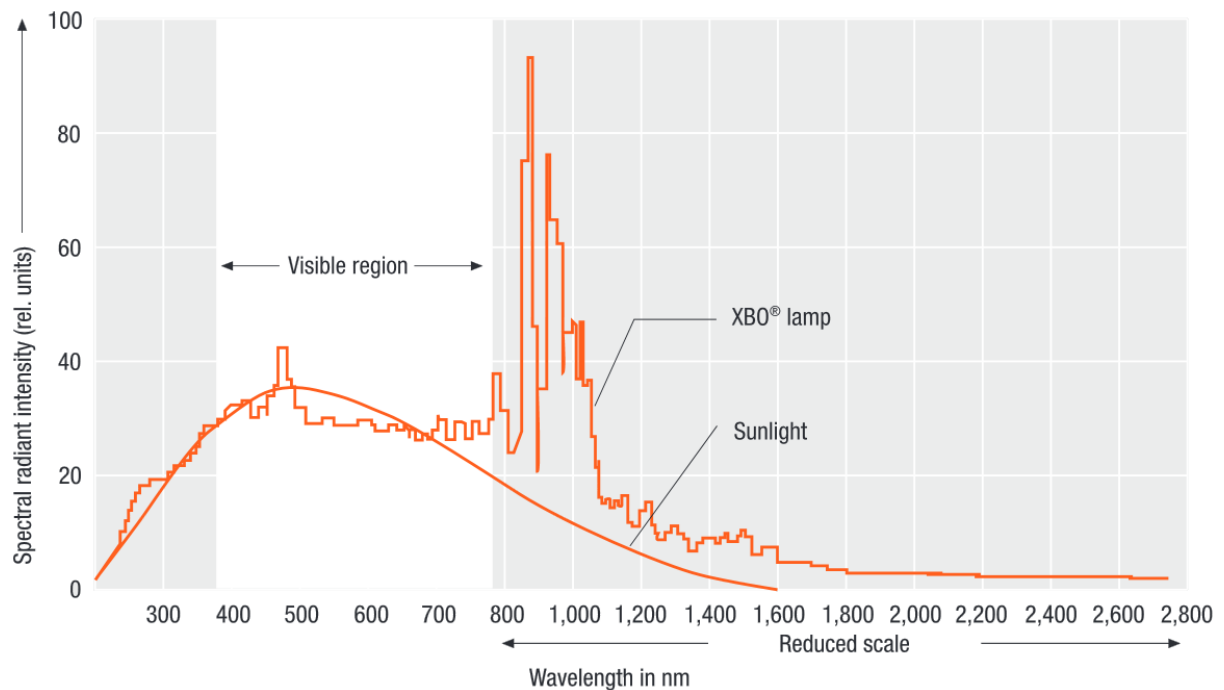


Abbildung 2.4. Spektrum einer Xenon-Kurzbogenlampe im Vergleich zum Schwarzkörperspektrum bei 6.200 K [19].

Die eingesetzten Lampen haben eine Nennleistung von 7 kW_{el} und werden mit einer Stromstärke von 160 A betrieben. Im Durchschnitt wird circa 80 % der zugeführten elektrischen Energie in Strahlung umgesetzt und der Rest konvektiv und leitend abgeführt. 60 % der elektrischen Energie wird vom Lichtbogen umgesetzt, wobei der größte Strahlungsanteil im nahen Infrarotbereich liegt. Die restlichen 20 % der Wärmestrahlung werden von der Kathode, dem Quarzglas Kolben und insbesondere von der Anode emittiert [19].

Die Strahlungsemission setzt sich aus circa 6 % ultravioletter Strahlung, 30 % sichtbarem Licht und 64 % Infrarot- beziehungsweise thermischer Strahlung zusammen (siehe Abbildung 2.4). Abhängig vom Hersteller wird bei manchen

Lampen die ultraviolette Strahlung unter 240 nm vom Quarzglaskolben unterdrückt. Dabei erzielt „Ozon-freies“ Quarz die besten Werte. Hochleistungslampen mit verhältnismäßig großen Anoden haben in der Regel eine niedrigere Farbtemperatur, was zu einem höheren Rotanteil im Spektrum führt [19]. Die Farbtemperatur liegt zwischen 6.000 und 6.500 K und ist im Vergleich höher als die Oberflächentemperatur der Sonne, die circa 5.778 K beträgt. Aus diesem Grund ist das Farbspektrum der Lampen geringfügig in den kürzeren Wellenlängenbereich verschoben, wodurch mehr ultraviolette Strahlung emittiert wird.

Xenon-Kurzbogenlampen mit einer hohen elektrischen Nennleistung haben eine verhältnismäßig hohe thermische Strahlungsemission. Ab einer Leistung von über 10 kW_{el} muss die thermische Verlustleistung der Anode mittels Kühlwasser abgeführt werden, da eine Luftkühlung nicht mehr ausreichend ist. Die Abgabe der thermischen Verlustleistung erfolgt vorwiegend durch Strahlung. Da die Temperatur der Wolframanoden nicht mehr erhöht werden kann, würde eine Leistungssteigerung zu einer Vergrößerung der Anodenfläche und damit zu einer Steigerung des Gewichts führen. Aus diesen Gründen führt eine zu hohe Leistungssteigerung der Lampen zu einer erheblichen Steigerung der Fertigungskosten und wirkt sich negativ auf die Lebensdauer leistungsstarker Xenon-Kurzbogenlampen aus [17].

2.2.2 Elliptischer Konzentrator

Abbildung 2.5 zeigt das Grundprinzip eines elliptischen Konzentrators. Der Mittelpunkt der Ellipse befindet sich im Ursprung des x-y-Koordinatensystems. Die Verbindungslinie zwischen einem Punkt der Ellipse und einem der beiden Brennpunkte heißt Brennnlinie. Die Ellipse verfügt über folgende Eigenschaften:

- Der Winkel zwischen zwei Brennnlinien in einem Punkt wird durch die Normale halbiert.
- Der Ein- und Ausfallwinkel der Brennnlinien zur Tangente bleibt konstant.

Ein von einem Brennpunkt ausgehender Lichtstrahl wird demnach an der Ellipsentangente zum anderen Brennpunkt reflektiert, wodurch alle vom Brennpunkt ausgehenden Lichtstrahlen im anderen Brennpunkt gebündelt werden.

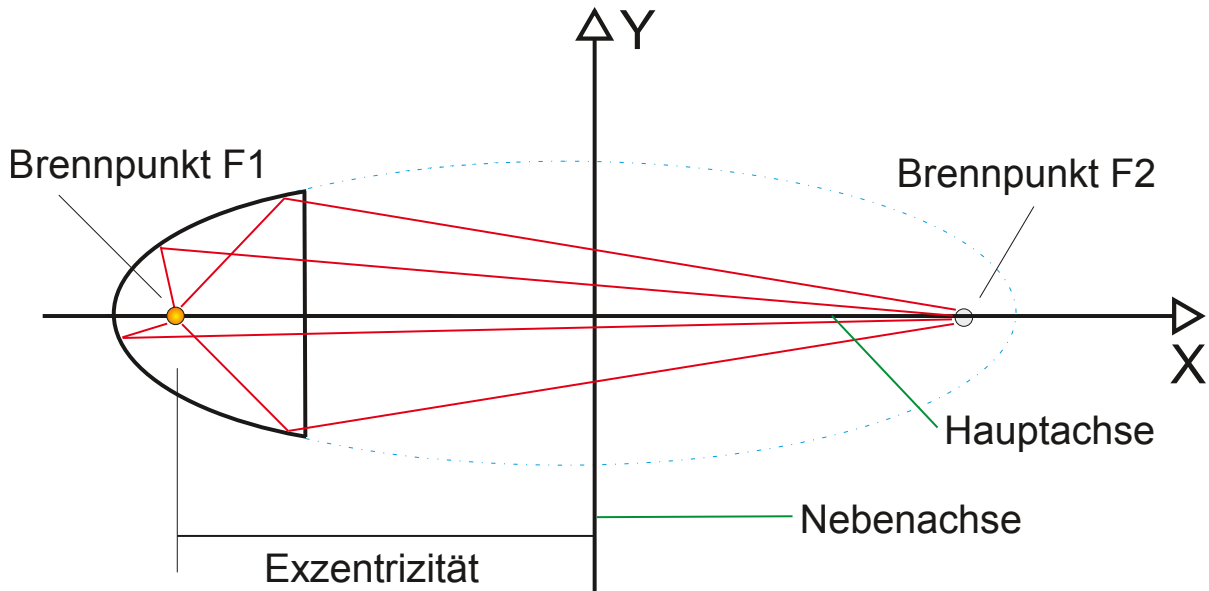


Abbildung 2.5. Prinzip des elliptischen Konzentrators [2].

In Abbildung 2.5 befindet sich die Lichtquelle auf der linken Seite im Brennpunkt F1 und die gebündelten Strahlen treffen sich im Fokus F2. Der Abstand der y-Achse zu den Brennpunkten F1 und F2 ist identisch. Die Form des Strahlers ergibt sich aus der Außenkontur der Ellipse. Die Konturberechnung des Strahlers erfolgt gemäß der Mittelpunktsleichung:

$$y = \pm \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} \quad (-a \leq x \leq a). \quad (2.2.1)$$

Dabei ist a die waagerechte Halbachse, auch Hauptachse der Ellipse genannt, und b die vertikale Halbachse, auch Nebenachse der Ellipse genannt [20]. Die Größe des elliptischen Konzentrators selbst wird unter Berücksichtigung des Abstrahlwinkels der verwendeten Lampen dimensioniert, um möglichst viel Strahlung einzufangen.

3 Methoden

3.1 Messverfahren

Die Evaluierung des Hochleistungsstrahlers erfordert ein schnelles und hochauflösendes Messverfahren, um die Flussdichteverteilung und die Gesamtstrahlungsleistung im Bereich der Apertur eines beliebigen Versuchsaufbaus zu bestimmen. Flussdichteverteilungen hochkonzentrierter Sonnenstrahlung werden am gängigsten mit einer indirekten Methode gemessen. Diese Methode besteht hauptsächlich aus einem Target - einer hochreflektierenden Fläche - und einer digitalen Kamera. Die Messung erfolgt, indem die Lichtquelle auf dem Target fokussiert und die dabei entstehende Projektion mit der Messkamera für die weitere Auswertung aufgenommen wird [6]. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.1 skizziert.

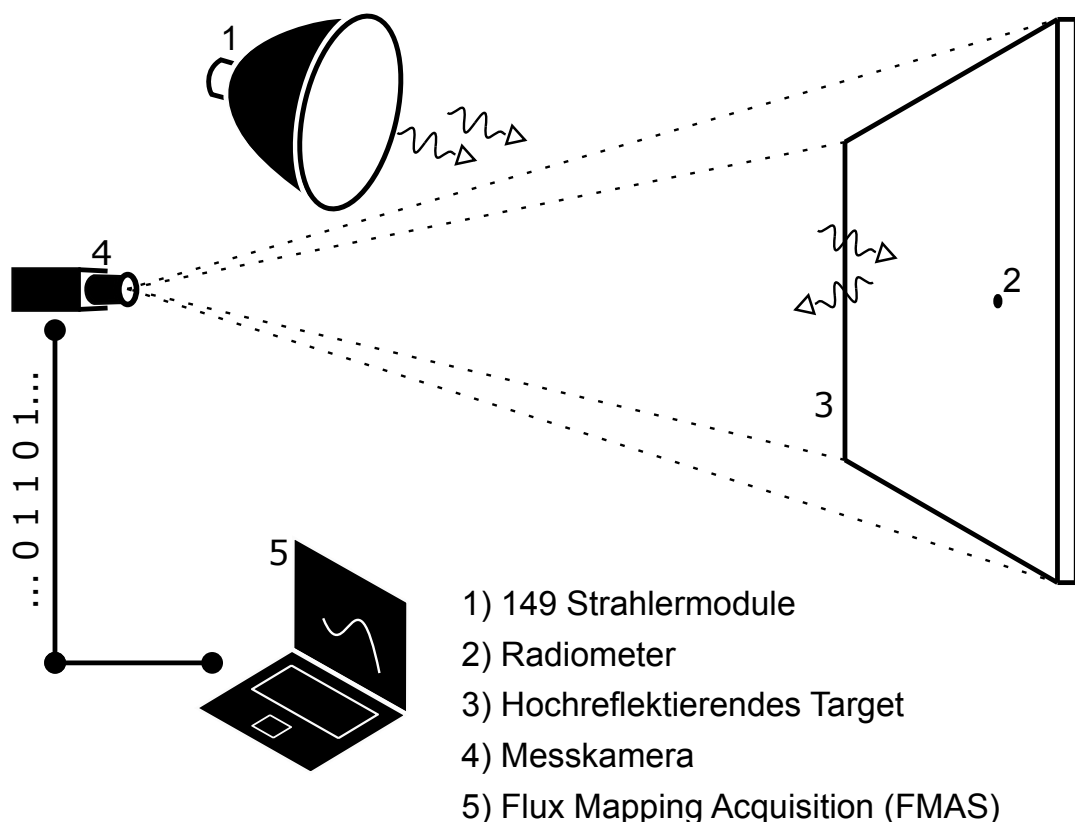


Abbildung 3.1. Versuchsaufbau der angewandten indirekten Messmethode, um die Flussdichteverteilung der Strahler zu bestimmen.

Die Helligkeitsunterschiede des Brennflecks auf dem hochreflektierenden Target werden vom Lichtsensor der Kamera registriert und anschließend mit Hilfe eines Rechners und einer vom DLR entwickelten Software namens Flux Mapping Acquisition System (FMAS) räumlich zugeordnet und tabellarisch ausgegeben. Der Zusammenhang zwischen der Höhe der Grauwerte und der Intensität des einfallenden Lichts in einem definierten Ort wird mittels einer vorherigen Messung mit einem Radiometer bestimmt [6, 21]. Zu den Vorteilen dieser Messmethode zählen folgende Eigenschaften:

- hohe räumliche Auflösung der Flussdichte,
- schneller und flexibler Versuchsaufbau,
- kurze Messzeiten und
- geringe Schadensanfälligkeit der Komponenten.

Allerdings hat die indirekte Messmethode der Flussdichteverteilung einige mögliche Fehlerquellen. Diese Fehlereinflüsse wurden von Ulmer in der Quelle [6] ausführlich untersucht:

- Einfluss des Einfallswinkels auf die Reflexionseigenschaften des Targets,
- Genauigkeit der Radiometer,
- spektrale Empfindlichkeit der Gardon-Radiometer,
- spektraler Transmissionsgrad der Graufilter und
- spektrale Gewichtung des Lichtsensors der Kamera.

Verwendet wird ein hochreflektierendes Target, eine monochrome Digitalkamera des Typs Pilot piA1000-48gm von Basler, ein Radiometer, ein Rechner mit einer aktuellen LabVIEW-Version und die Software FMAS. Zunächst werden alle verwendeten Komponenten näher beschrieben und anschließend den angewandten Verlauf einer qualitativen Leistungsmessung angeleitet.

3.1.1 Radiometer

Die hohe Strahlungsflussdichte punktkonzentrierender Solartechnologien kann nur durch technisch sehr aufwendige Radiometer erfasst werden, die kommerziell kaum erhältlich sind. Einer der wenigen Hersteller dieser Radiometer ist die Firma Vatell in Christiansburg, Virginia [6, 22].

Gardon-Radiometer

Das älteste noch verwendete Messprinzip entstand im Jahr 1953 und wird nach seinem Entwickler Gardon benannt. Radiometer dieser Art wurden vor einigen Jahren von den Herstellern Hycal und Thermogage produziert. Allerdings wurde die Produktion eingestellt und der Hersteller Vatell übernahm im Jahr 1996 die Produktion. Seither vertreibt Vatell die Radiometer unter den Namen Hycal und Thermogage [6, 21, 23].

Gardons Messmethode setzt sich aus einem wassergekühlten Kupfergehäuse mit einer zylindrischen Bohrung und einer Folie aus einer Kupfer-Nickel-Mangan Legierung namens Konstantan zusammen. Das Gehäuse besteht aus sauerstofffreiem und hochleitendem OFHC-Kupfer (Oxygen-free High Conductivity), um die Reinheit des Signals zu verbessern (siehe Abbildung 3.2).

Der Messwandler ist ein Differentialthermoelement, das den Potentialunterschied zwischen dem im Zentrum angeschweißten Kupferdraht und dem Außenrand der kreisförmigen Folie ausgibt. Wird die Konstantanfolie bestrahlt oder einem Wärmestrom ausgesetzt, erhöht sich die Temperatur der Folie. Die thermische Energie wird durch den Grundkörper vom zirkulierenden Wasser abgeführt. Dadurch stellt sich ein parabolischer Temperaturverlauf ein, bei dem die Temperatur von innen nach außen abnimmt, wie es schematisch in Abbildung 3.2 dargestellt wird. Die Thermospannung der Kupfer/Konstantan-Thermoelementpaarung verhält sich linear zur Temperatur und ist direkt proportional zum Wärmestrom. Die Linearität des Messbereichs ergibt sich aus kompensierenden Effekten bei temperaturabhängigen Änderungen des Seebeck-Koeffizienten und der Wärmeleitfähigkeit. Diese Sensoren messen Strahlungs- beziehungsweise

konvektive Wärmeflüsse und zeichnen sich durch besonders schnelle Reaktionszeiten aus [6, 24, 25].

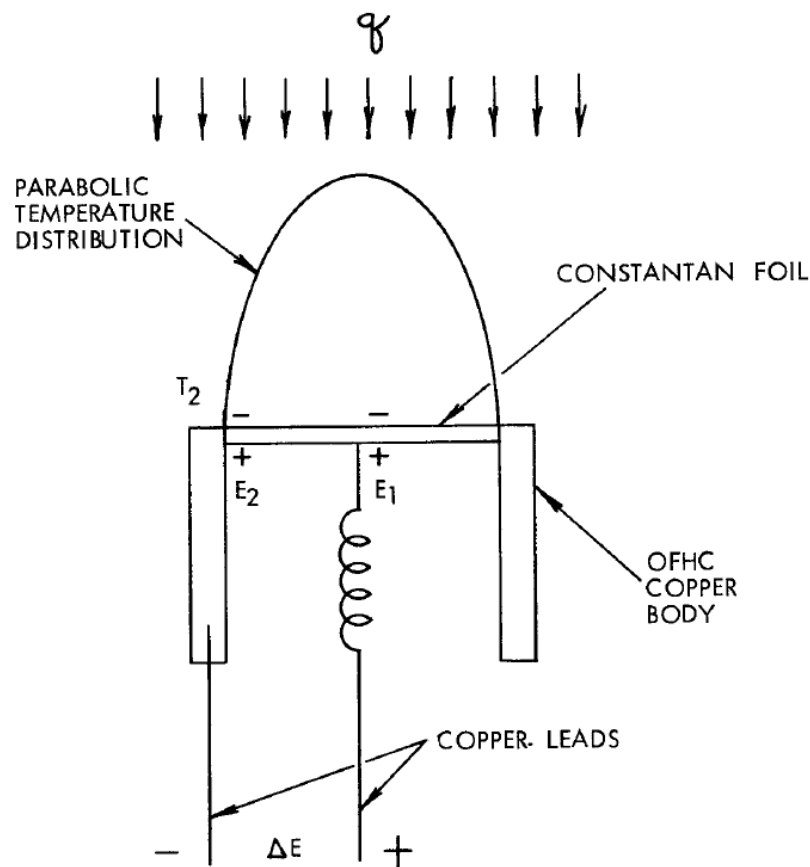


Abbildung 3.2. Grundprinzip des Gardon-Radiometers [24, 25].

Thermogage Sensoren sind in der Regel mit einer Hochtemperatur-Schwarz-Lackierung beschichtet, um den Emissionsgrad der Frontseite zu reduzieren. Im Durchschnitt wird circa 95 % der einfallenden Strahlung absorbiert. Die Beschädigung dieser Beschichtung führt zu einer Änderung des Emissionsvermögens der Frontseite und folglich zur fehlerhaften Messausgabe [21, 24]. Der Hersteller empfiehlt sauberes Kühlwasser, eine jährliche Neukalibrierung des Radiometers und dass der Widerstand inklusive Anschlussleitungen einen Wert von 5 Ohm nicht überschreitet [24].

Kendall-Radiometer

Der Erfinder Kendall veröffentlichte das Messprinzip im Jahr 1970 [26]. Allerdings werden die Radiometer dieser Art seit Kendalls Tod im Jahr 1987 nicht

mehr hergestellt [6]. Dieser selbstkalibrierende Sensor besteht aus einem dunklen Hohlraum und einer kleinen geschwärzten Aperturöffnung (siehe Abbildung 3.3). Die durch die Apertur einfallende Strahlung wird absorbiert und als Wärmestrom über einen Wärmewiderstand in den gekühlten Grundkörper übertragen. Der gemessene Wärmestrom ergibt sich aus der Temperaturdifferenz am Wärmewiderstand. Die Temperaturmessung erfolgt mit Hilfe von 32 in Reihe geschalteten Thermoelementen. Die warmen Messstellen entstehen an der bestrahlten Apertur und die Kühlen an einer Kompensationsapertur im Innern des Radiometers, wobei beide Aperturen über die gleiche thermische Trägheit verfügen. Der Wärmewiderstand filtert schnelle Temperaturänderungen des Grundkörpers und macht die Messergebnisse genauer. Der Heizwiderstand an der bestrahlten Apertur kann einen Wärmestrom erzeugen, der der absorbierten Strahlung gleichwertig ist. Die Ermittlung der elektrischen Leistung am Heizwiderstand zusammen mit der Thermospannung ermöglicht die Selbstkalibrierung des Radiometers [6].

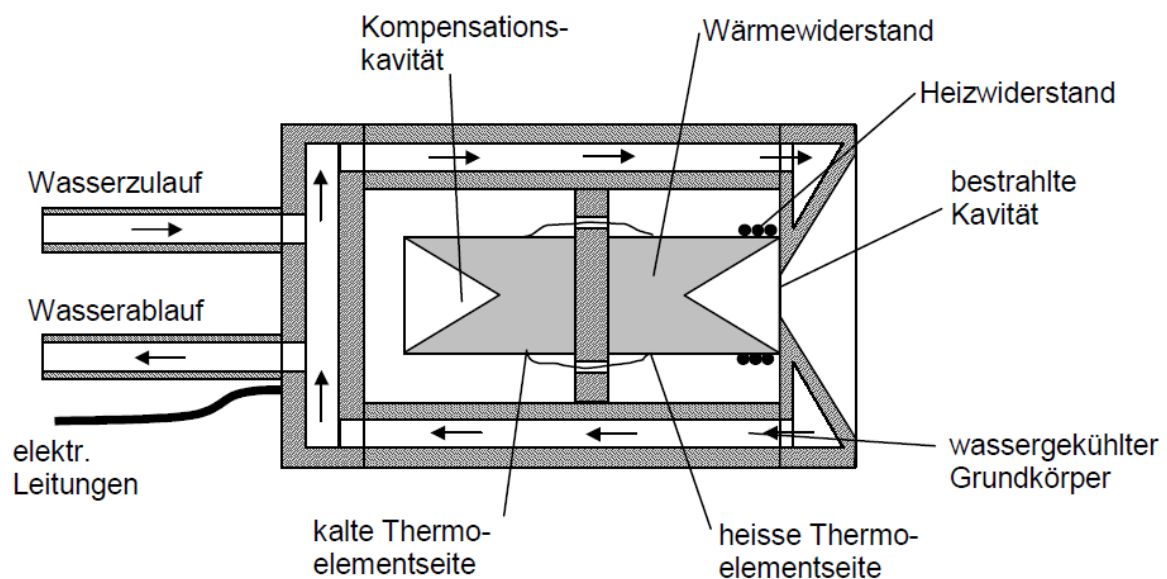


Abbildung 3.3. Grundprinzip des Kendall-Radiometers [6].

Diese Radiometer können für die Kalibrierung der Gardon-Radiometer eingesetzt werden und verfügen laut Hersteller über eine Messgenauigkeit von $\pm 1 \%$. Kendall-Radiometer haben folgende Maße:

- 50 - 60 mm Außendurchmesser,
- 90 - 120 mm Länge,
- 1 - 4 mm Aperturdurchmesser und
- 60 ° Akzeptanzwinkel, mit dem Cosinuseffekte kompensiert werden können.

Eingesetzte Gardon-Radiometer

Da die Kendall-Radiometer nicht mehr hergestellt werden, wurden für dieses Messverfahren drei Gardon-Radiometer von Vatel Corporation mit der Modellnummer TG1000-4 ausgewählt. Die technischen Spezifikationen der Radiometer sind in der Tabelle 3.1 aufgelistet.

Tabelle 3.1. Eingesetzte Thermogage Circular-Foil Heat Flux Transducer.

Seriennummer	10191	10192	10193
Skalierungsfaktor [kW/m ² /mV]	99,77	415,51	853,63
Empfindlichkeit [mV/kW/m ²]	0,010	0,002	0,001
Messbereich [kW/m ²]	0 - 997,7	0 - 4.155,1	0 - 8.536,3
Beschichtung	Pyromark 1200	Kolloider Graphit	
Emissionsvermögen	0,95	0,82	
Widerstand [Ω]	1		
Umgebungstemperatur [°C]	23		
Feuchtigkeit [%]	44		

Die ausgewählten Radiometer unterscheiden sich hauptsächlich im Messbereich. Das Radiometer mit der Seriennummer 10191 eignet sich mit dem Messbereich von 0 - 998 kW/m² für die Messerfassung einzelner Strahler und kleiner Gruppierungen. Die Radiometer der Seriennummern 10192 und 10193 haben die Messbereiche 0 - 4.155 kW/m², 0 - 8.536 kW/m² und eignen sich besonders für verhältnismäßig große Strahlergruppierungen.

Laut der amerikanischen Standardisierungsorganisation American Society for Testing and Materials (ASTM) kann der Messbereich herkömmlicher Wärmestrommesswandler bis zu 100.000 kW/m² betragen. Größere Messbereiche

werden hauptsächlich durch die Kühlung limitiert, da eine Überhitzung im Zentrum der Konstantanfolie nicht verhindert werden kann. In allen Fällen erstreckt sich der Messbereich bis 10 mV. Eine Überschreitung von 50 % ist zwar zulässig, allerdings wird dadurch die Lebensdauer des Radiometers erheblich verkürzt. Zwischen 15 mV und 20 mV verhält sich das Signal nicht linear und die Kalibrierungsdaten verlieren ihre Geltung. Ab 20 mV wird der Messwandler beschädigt. Allgemein sollte eine Überschreitung des Messbereichs vermieden werden, um die Linearität der Messwandler nicht zu gefährden [24, 25].

Der Messbereich der Radiometer kann vergrößert werden, indem der Foliendurchmesser reduziert oder die Foliendicke erhöht wird. Allerdings wirkt sich die Größe des Durchmessers auf die Reaktionszeit aus. Die Genauigkeit dieser Radiometer beträgt laut Hersteller $\pm 3 \%$ und wird auf den Kalibrierungszertifikaten angegeben.

3.1.2 Target

Ein Target ist eine Bestrahlungsoberfläche, die besonders hohe konzentrierte Strahlungsflüsse aushält und gleichzeitig homogen reflektieren soll. Aus praktischen Gründen ist es notwendig sowohl die Bestrahlungs- als auch die Beobachtungsrichtung beliebig wählen zu können, ohne die Messergebnisse signifikant zu beeinflussen. Zusätzlich muss das gesamte Spektrum der eingesetzten CCD-Kamera von der reflektierten Strahlung vollständig gedeckt sein [6].

Targets werden in der Solartechnik stationär im Strahlengang an Stelle des Versuchsaufbaus eingesetzt oder nur kurzzeitig durch den Strahlengang geschwenkt. Schwenktargets können vor dem stehenden Versuchsaufbau eingesetzt werden. Spontane, schnelle und relativ einfache Messungen sind möglich und aufgrund der kurzen Bestrahlungszeiten verzichten Schwenktargets meist auf eine Wasserkühlung. Allerdings sind diese Targets auf einen einzigen Versuchsraum beschränkt.

Targets, die stationär während der Messung eingesetzt werden, können dagegen in verschiedenen Versuchsräumen flexibel verwendet werden. Selbst wenn der Versuchsaufbau vom theoretischen Brennpunkt abweicht, kann die Positionierung des Targets problemlos angepasst werden. Stationäre Targets verfügen über eine Wasserkühlung, die längere Bestrahlungszeiten ermöglicht. Allerdings muss bei Bedarf der Versuchsaufbau zur Seite bewegt werden, um das Target zu positionieren [6].

Technische Anforderungen

Der Hochleistungsstrahler Synlight ist mit drei Bestrahlungsräumen versehen, die unterschiedliche Geometrien aufweisen (siehe Kapitel 1.1). Alle Versuchsräume befinden sich auf derselben Ebene und sind durch ein Schienensystem miteinander verbunden. Über das Schienensystem kann der jeweilige Versuchsaufbau transportiert oder kurzzeitig verschoben werden [27].

Allgemein und speziell für den Anwendungsbereich bei Synlight ist die naheliegendste Lösung ein stationäres und wassergekühltes Target einzusetzen, das folgende Anforderungen erfüllt:

- hoher und richtungsunabhängiger Reflexionsgrad für sonnenähnliche Spektren [6],
- hohe Temperaturbeständigkeit,
- hohe mechanische Belastbarkeit,
- hohe Wärmeleitung,
- flexibler Einsatz in mindestens drei Versuchsräumen,
- platzsparende und bewegliche Lagerung,
- niedriges Gewicht für einen sicheren Transport,
- relativ große Bestrahlungsfläche von ca. 2 x 2 m [1],
- relativ einfache und wirtschaftliche Herstellung,
- eine seitlich angeordnete Durchgangsbohrung für ein Gardon-Radiometer und
- möglichst selbstentleerend.

Planung eines wassergekühlten Targets

Die angeforderten physikalischen Eigenschaften wie Temperaturbeständigkeit, mechanische Belastbarkeit, Wärmeleitfähigkeit, Wasserbeständigkeit, niedriges Gewicht und eine relativ einfache und wirtschaftliche Verarbeitung werden von kaum einem anderen Werkstoff als Aluminium gedeckt. Die besonders hohe Wärmeleitung des Aluminiums beträgt circa $236 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ und ermöglicht eine schlagartige Dispersion der zugeführten thermischen Energie. Allerdings kann Aluminium mit seiner geringen Schmelztemperatur von 630 °C zusammen mit der geringen Wärmekapazität von etwa $0,897 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ problemlos nach wenigen Minuten im Strahlengang der Anlage schmelzen. Da die Wärmekapazität des Wassers ($4,182 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) um circa Faktor vier höher als die des Aluminiums ist, muss bei der Gestaltung des Targets darauf geachtet werden, möglichst viel Volumen mit Wasser zu füllen.

Abbildung 3.4 zeigt die Endversion des entworfenen Targets. Bei dieser einfachen Konstruktion fließt das Kühlwasser unten durch zwei $1 \frac{1}{4}''$ Gewindemuffen ins Target hinein, strömt innerhalb der parallel angelegten Kanäle nach oben und anschließend fließt es durch eine einzige Gewindemuffe aus dem Target hinaus. Auf der linken Seite in der Mitte befindet sich eine Durchgangsbohrung für das Radiometer.

Diese Konstruktion basiert auf bereits existierende natriumgekühlte Röhrenreceiver, die beispielsweise in der ersten australischen Solarturm-Testplattform namens Jamalong Solar Thermal Station eingesetzt wurden [28]. Bei dieser Architektur führt eine Temperaturerhöhung in einem der Kanäle zu einem unmittelbaren Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers. Auf diese Weise wird eine selbstfördernde thermische Energieabfuhr angestrebt. Zusätzlich sorgt die unsymmetrische Anordnung der Gewindemuffen für eine homogene Verteilung der Strömung innerhalb des Targets. Die geforderten Reflexionseigenschaften werden mittels einer weißen und wärmebeständigen Beschichtung erreicht [6, 29]. Die gewählte Targetbeschichtung besteht aus Aluminiumoxid und wird mit einer Schichtdicke von etwa $350 \text{ }\mu\text{m}$ einseitig aufgetragen.

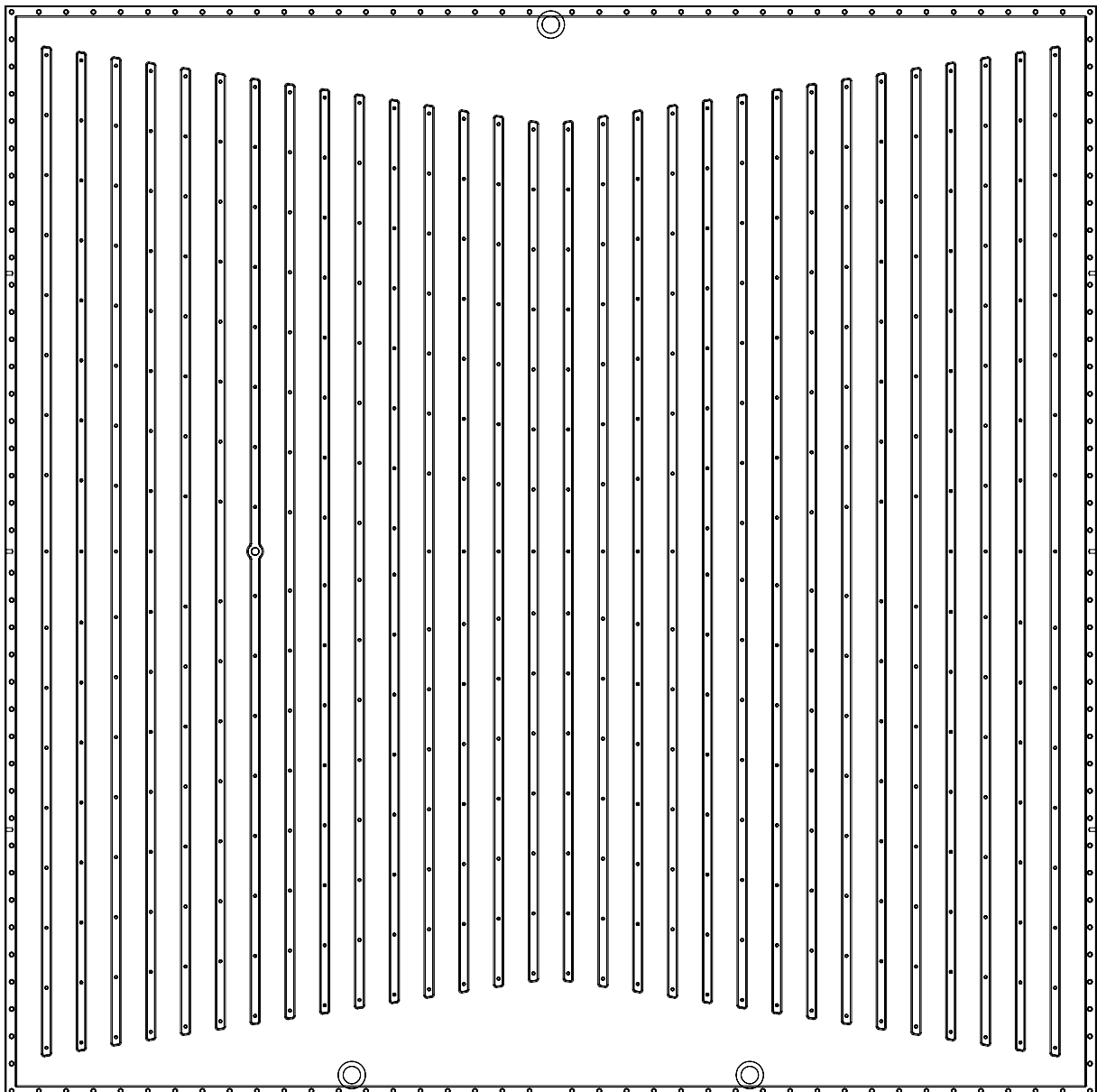


Abbildung 3.4. Technische Zeichnung der Baugruppe: Transparente Vorderansicht des 2 x 2 m Targets mit parallel angelegten Wasserkanälen, zwei Eingängen (unten) und einem Ausgang (oben).

Rohrsystem für die Wasserversorgung

Der Wasserzulauf besteht aus einem transparenten PVC-Schlauch mit einem Innendurchmesser von 32 mm und ist durch einen Drei-Wege-Kugelhahn mit

dem Target und dem Wasserablauf verbunden (siehe Abbildung 3.5). Unmittelbar nach dem Wasserzulauf wird das Radiometer durch einen transparenten PVC-Schlauch mit einem Innendurchmesser von 4mm versorgt.

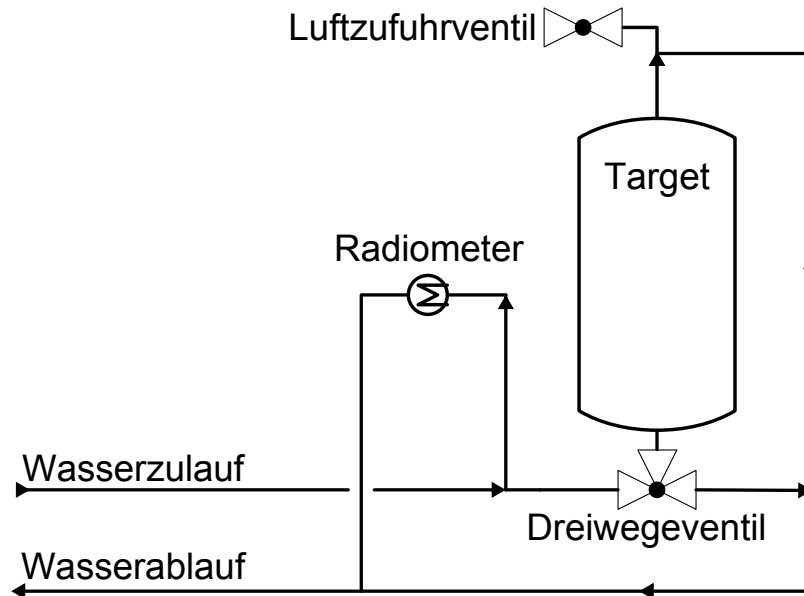


Abbildung 3.5. Rohrsystem für die Wasserversorgung des Targets und des Radiometers.

Die Schläuche des Wasserzu- und Wasserablaufs sind mittels Camlock-Kupplungen abmontierbar. Zusätzlich ermöglicht der Drei-Wege-Kugelhahn durch eine L-Bohrung zusammen mit dem oberen Luftzufuhrventil die vollständige Entleerung des Targets. Dadurch kann das gesamte System innerhalb weniger Minuten auf- und abgebaut werden.

Realisierung des Targets

Das Target wurde aus einer 2000 x 2000 x 25 mm Aluminiumplatte mit Hilfe einer CAD-Konstruktion gefräst und mit Aluminiumoxid einseitig beschichtet. Auf der anderen Seite wurde eine Dichtmaße gleichmäßig aufgetragen und anschließend eine Abdeckung mit den drei festgeschweißten Gewindemuffen verschraubt. Das fertige Target wurde auf einem rollenden Gestell aus Aluminiumprofilen montiert und das Rohrsystem implementiert. Abbildung 3.6 zeigt die Vorder- (links) und die Rückseite (rechts) des fertigen Targets.



Abbildung 3.6. Vorder- und Rückseite des fertigen Targets.

3.1.3 Strahlerpositionierung

Die Positionierung der Strahler wird mittels eines mathematischen Modells beschrieben und anschließend über die Software an die Schrittmotoren übertragen. Die Implementierung der Software wurde im Rahmen eines anderen Projekts realisiert. Die Übersetzung der räumlichen Dimensionen in Schritten wurde in der Quelle [30] ausführlich beschrieben, wobei einige Dimensionen des Strahlermoduls im Laufe des Projekts geändert wurden. Die Herleitung des mathematischen Modells zur gesamten Strahlerausrichtung wird in folgendem Abschnitt beschrieben.

Abbildung 3.7 skizziert die räumliche Anordnung für den optimalen Betrieb der Strahler (siehe auch die geometrischen Eigenschaften eines elliptischen Konzentrators im Kapitel 2.2.2). Da der Mittelpunkt der Drehachsen des Strahlermoduls nicht genau im Brennpunkt der Lichtquelle liegt, verschiebt sich der Brennpunkt bei einer Drehung des Strahlermoduls. Um die Anzahl der Unbekannten bei einer mathematischen Beschreibung zu minimieren, wird anstelle der Brennweite von 8 m der Abstand r zwischen dem Fokus und dem Mittelpunkt der Drehachsen betrachtet. Der Abstand r wird durch die axiale Verschiebung in x -Richtung eingestellt und bleibt bei jeder beliebigen Drehung des betrachteten Strahlermoduls konstant.

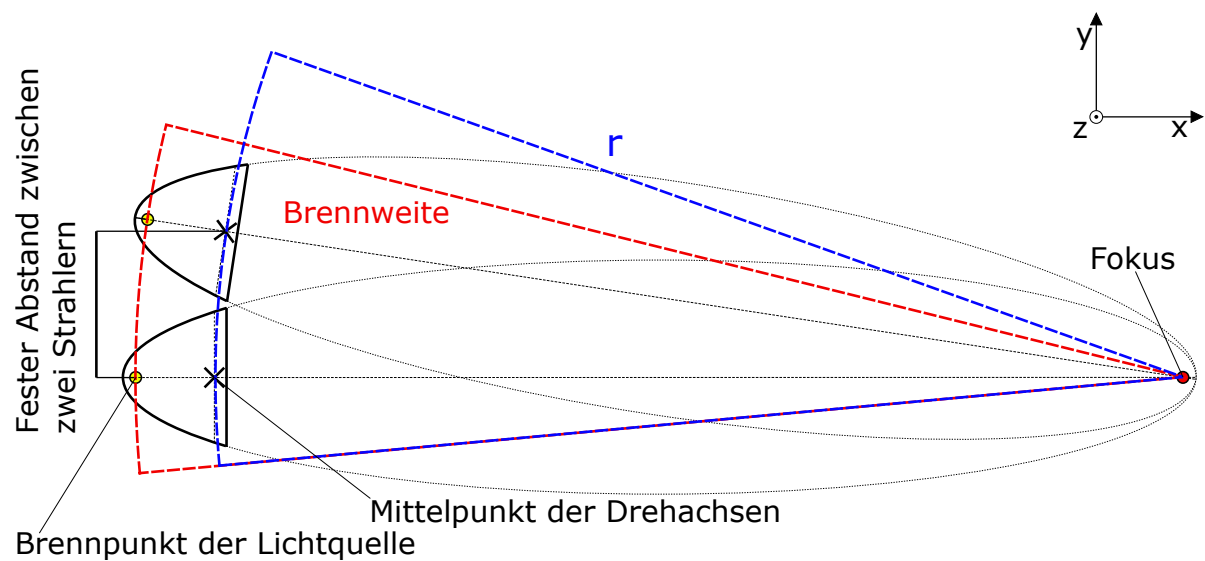


Abbildung 3.7. Zwei benachbarte, auf einem Punkt fokussierte Strahler und der Radius r zwischen dem Fokus und dem Mittelpunkt der Drehachsen des Strahlermoduls.

Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im Mittelpunkt der Drehachsen des mittleren Strahlers G6 (Abbildung 3.8). Die x-y-Ebene streckt sich über die Draufsicht und die y-z-Ebene über die Vorderansicht des Strahlers. Die y-z-Ebene hat einen Abstand von 6,955 m zur gegenüberliegenden Kante der Versuchsräume. Die drei Bewegungsmechanismen der Strahlermodule sind folgendermaßen definiert:

- Axial: Horizontale Verschiebung über die x-Achse.
- Azimut: Drehung um die vertikale z-Achse.
- Elevation: Drehung um die y-Achse.

Der Radius r ist die Differenz der Brennweite und des projizierten Abstands zwischen dem Brennpunkt und den Drehachsen des Strahlers. Eine Kettenbe-maßung des Strahlers plus die Fokusslänge ergibt

$$r = (8 + 0,1 - 0,699 + 0,2395) \text{ m} = 7,6405 \text{ m}. \quad (3.1.1)$$

Der Abstand zwischen zwei benachbarten Strahlern in y- und in z-Richtung be-trägt jeweils $a_y = 1,1 \text{ m}$ und $a_z = 0,953 \text{ m}$.

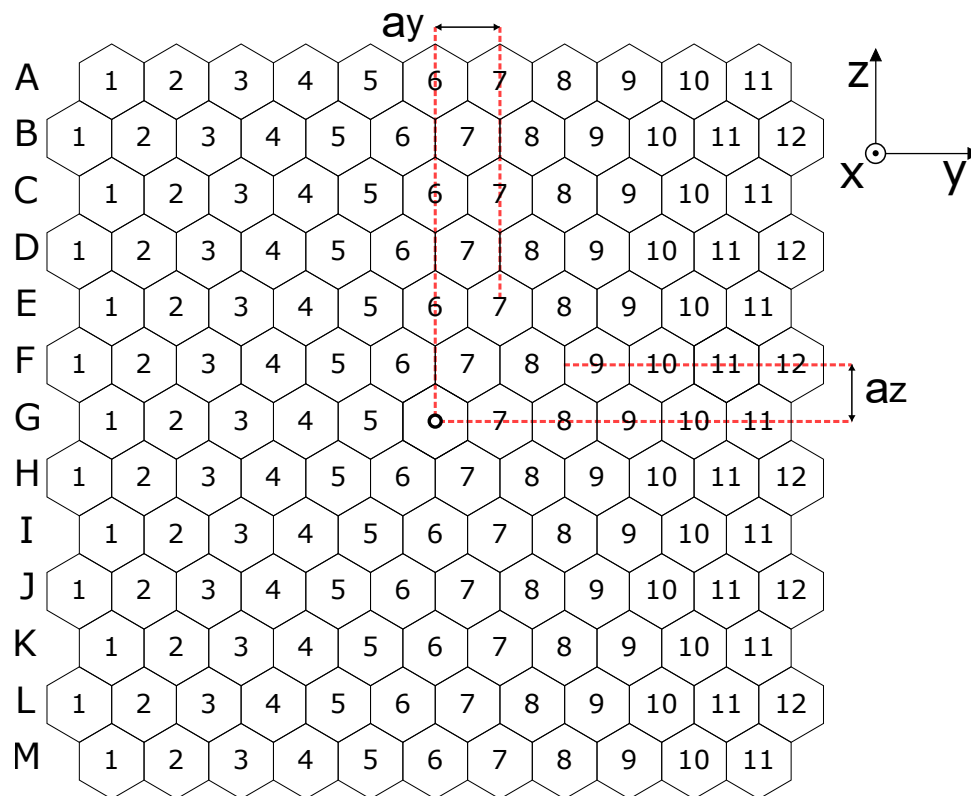


Abbildung 3.8. Vorderansicht des Strahlers mit dem Koordinatensystem x-y-z, dem Koordinatenursprung in G6 und den jeweiligen Abständen a_y und a_z .

Wenn alle Strahler auf den Fokus ausgerichtet werden, entsteht eine kugelförmige Struktur mit dem Radius r zwischen dem Fokus und den Drehachsen der Strahlermodule. Die mathematische Beschreibung der Kugel wird auf die Ebenen x-y und x-z quantisiert, um anschließend die Verschiebung und die Auslenkung der Strahlermodule zu bestimmen (siehe Anhang A.2).

Projektion auf der x-y-Ebene und auf der x-z-Ebene

Abbildung 3.9 zeigt die x-y Ebene und einige projizierten Abstände, wenn der Fokus in y-Richtung um f_y verschoben ist. Mit Hilfe der Skizze können folgende Größen definiert werden:

- Radius r der kugelförmigen Struktur,
- Winkel ϕ zwischen dem Fokus und der x-Achse und
- Horizontale Verschiebung des Fokus f_y in y-Richtung.

Die Abstände s_y und s_{xy} ergeben sich aus der Position des betrachteten Strahlers in Bezug auf das Strahlermodul G6. Wie Abbildung 3.8 zeigt, gilt für die Reihen A, C, E, G, I, K und M

$$a_y (\text{Spaltennummer} - 6) = s_y. \quad (3.1.2)$$

Für die Reihen B, D, F, H, J und L gilt

$$a_y (\text{Spaltennummer} - 6,5) = s_y. \quad (3.1.3)$$

Nach den Winkelbeziehungen an einem rechtwinkligen Dreieck mit einer horizontalen Verschiebung des Fokus f_y gilt

$$s_y - f_y = h \tan \phi \Rightarrow \arctan \left(\frac{s_y - f_y}{h} \right) = \phi, \quad (3.1.4)$$

$$s_{xy} = r - h. \quad (3.1.5)$$

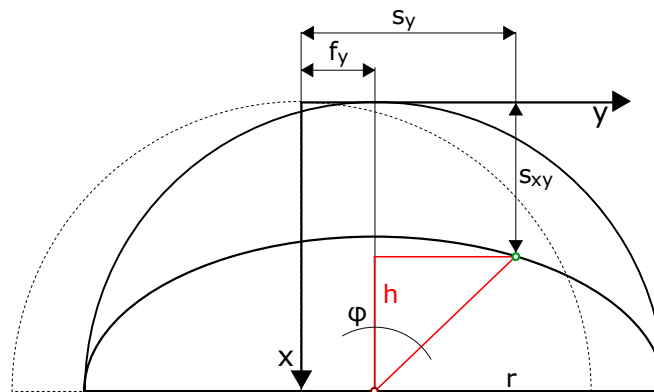


Abbildung 3.9. x-y-Ebene der kugelförmigen Struktur ausgehend von einem um f_y verschobenen Fokus.

Die Bestimmung von h erfolgt hauptsächlich über die vertikale z-Koordinate des betrachteten Strahlers. Eine räumliche Darstellung der kugelförmigen Struktur ist in Abbildung 3.10 zusammen mit einigen projizierten Flächen und Abständen dargestellt. Der vertikale Abstand zwischen G6 und dem betrachteten Strahler ist s_z .

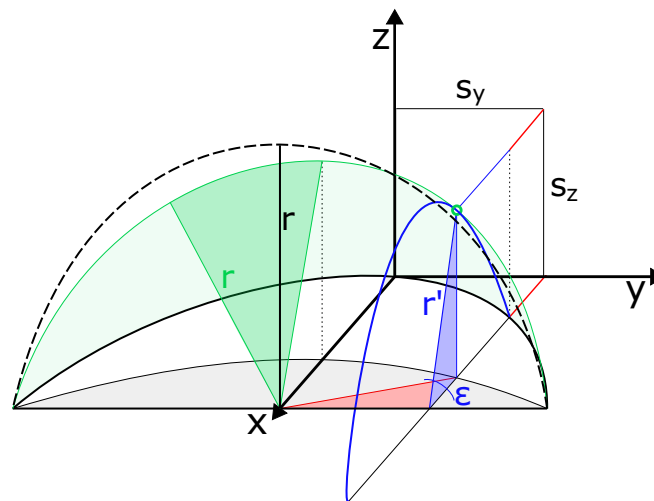


Abbildung 3.10. Räumliche Darstellung der kugelförmigen Struktur mit einigen projizierten Abständen und Flächen.

Die Abstände s_z errechnen sich aus folgender Beziehung

$$a_z (7 - \text{Zeilennummer}) = s_z. \quad (3.1.6)$$

Der betrachtete Punkt erzeugt einen im Bild 3.10 grün gekennzeichneten Schnittkreis. Die waagerechte Projektion des Schnittkreises auf der x-y-Ebene erzeugt eine Ellipse mit einer gleichbleibenden Halbachse r und einer bei ansteigender Höhe klein werdenden Halbachse (siehe Abbildung 3.9).

Die Position des betrachteten Strahlers erzeugt eine im Bild 3.10 blau gekennzeichnete Ebene, die die Kugel in einem Schnittkreis mit dem Radius r' schneidet. Der Radius r' errechnet sich aus

$$r' = \sqrt{r^2 - (s_y - f_y)^2}. \quad (3.1.7)$$

Eine Verschiebung des Fokus um f_y ist in Abbildung 3.10 gleich null, um die Darstellung nicht zu verkomplizieren. Mit Hilfe von r' kann h aus dem blau gekennzeichneten Dreieck errechnet werden.

$$h = \sqrt{r'^2 - (s_z - f_z)^2} \Rightarrow h = \sqrt{r^2 - (s_y - f_y)^2 - (s_z - f_z)^2} \quad (3.1.8)$$

Eine vertikale Verschiebung des Fokus in z-Richtung wird als f_z bezeichnet.

Aus der Projektion des blau gekennzeichneten Dreiecks folgt

$$s_z = f_z + r' \sin \epsilon \Rightarrow \arcsin \left(\frac{s_z - f_z}{r'} \right) = \epsilon. \quad (3.1.9)$$

Verschiebung, Azimut- und Elevationswinkel

Der Azimutwinkel wird mit den Gleichungen 3.1.4 und 3.1.8 folgendermaßen berechnet:

$$\phi = \arctan \left(\frac{s_y - f_y}{\sqrt{r^2 - (s_y - f_y)^2 - (s_z - f_z)^2}} \right). \quad (3.1.10)$$

Der Elevationswinkel wird mit den Gleichungen 3.1.9 und 3.1.7 folgendermaßen berechnet:

$$\epsilon = \arcsin \left(\frac{s_z - f_z}{\sqrt{r^2 - (s_y - f_y)^2}} \right). \quad (3.1.11)$$

Die axiale Verschiebung ist auf Abbildung 3.10 rot und blau gekennzeichnet und ergibt sich aus den Gleichungen 3.1.5 und 3.1.8:

$$s_{axial} = r - h \Rightarrow s_{axial} = r - \sqrt{r^2 - (s_y - f_y)^2 - (s_z - f_z)^2}. \quad (3.1.12)$$

3.1.4 Kamera

Charge-Coupled Device (CCD) - Sensor

Der CCD-Sensor ist ein Lichtdetektor, der auf eine spezielle Wechselwirkung zwischen Licht und Materie namens innerer Photoeffekt beruht. Beim inneren Photoeffekt wird die Zunahme der Leitfähigkeit eines Halbleiters aufgrund von Elektron-Loch-Paaren beschrieben. Die Erzeugung freier Ladungsträger resultiert aus der Absorption hinreichend energetischer Lichtquanten. Ein CCD-Chip besteht aus vielen Sensorelementen, sogenannten MOS-Kondensatoren (Metal Oxide Semiconductors) und jedes Element bildet ein Pixel des gesamten Chips. Das Bild 3.11 zeigt den Grundaufbau eines MOS-Kondensators.

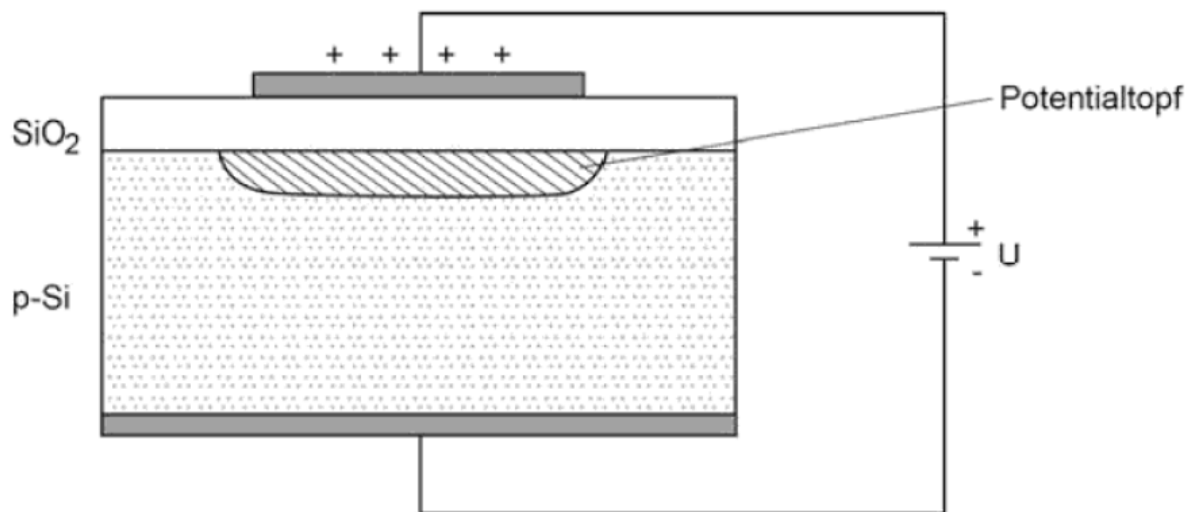


Abbildung 3.11. Prinzipieller Aufbau eines MOS-Kondensators [31, S. 127].

Das Sensorelement besteht aus einer besonders schmalen p-dotierten Siliziumschicht von $\approx 25 \mu\text{m}$, einer Siliziumdioxid-Isolationsschicht (SiO_2) und einer durchsichtigen MOS-Elektrode. Die positiv vorgespannte Elektrode verdrängt die Löcher und bildet in der p-dotierten Siliziumschicht einen verarmten Potentialtopf. Wird ein Photon von der p-dotierten Schicht absorbiert, entsteht ein Elektronen/Loch-Paar gemäß dem inneren Photoeffekt. Die Ladungsträger werden aufgrund einer angelegten Spannung getrennt und dabei wird jedes erzeugte Elektron auf den Potentialtopf übertragen. Die Ladungsmenge im Potentialtopf ist proportional zur eingestrahltten Lichtmenge.

Anschließend werden die Ladungen schrittweise verschoben bis die Ladungspakete den Ausleseverstärker erreichen. Die Lichtmenge entspricht eine Spannung, die von den einzelnen Pixeln nacheinander ausgegeben wird [21, 31]. Ein Foto setzt sich aus den gemessenen Ladungen der jeweiligen Pixel zusammen. Mathematisch kann das Bild als eine zweidimensionale Matrix mit Helligkeitswerten ausgedrückt werden, wobei die Matrixindizes die räumliche Position der Fotodioden im Sensor beschreiben [21].

Objektiv, Blende und Graufilter

Die Strahlung, die vom CCD-Sensor absorbiert wird, muss vorher moduliert werden, um ein scharfes Bild mit einer optimalen Helligkeit zu erzielen. Ein Objektiv

ermöglicht die Projektion des Lichts auf die relativ kleine Bildebene, in der sich der lichtempfindliche Chip befindet. Das Kameraobjektiv verfügt über eine Blende, die über die Blendzahl eingestellt und über die Blendenöffnung die Lichtmenge reguliert.

Die Helligkeit des Bildes kann durch die Belichtungszeit oder mittels eines Graufilters reguliert werden. Bei leistungsstarker Strahlung wird der Einsatz von Graufiltern vorgezogen. Graufilter oder Neutraldichtefilter - kurz ND-Filter - verringern die Intensität des einfallenden Lichts ohne die Helligkeitsverteilung und das Spektrum zu beeinträchtigen (siehe auch [21, S. 15]). Für die Neutraldichte x und die Transmission τ gilt

$$\tau = 10^{-x}. \quad (3.1.13)$$

Eingesetzte Kamera

Für die Visualisierung der Helligkeitsverteilung wird eine Pilot piA1000-48gm Kamera von Basler verwendet [32]. Die monochrome Kamera registriert eine reine Helligkeitsverteilung und verfügt über einen CCD-Sensor vom Typ KAI-1020 [21, 33]. Die monochrome Quanteneffizienz des KAI-1020 deckt das gesamte Sonnenspektrum ab, wie Abbildung 3.12 zeigt und hat eine maximale Abtastrate von 48 Bilder pro Sekunde.

Die Auflösung der Kamera ist 1.004 x 1.004 Pixel und die Pixelgröße beträgt 7,4 x 7,4 μm . Starke Helligkeitsunterschiede zwischen benachbarten Pixeln können bei herkömmlichen Lichtsensoren zu fehlerhaften Ladungsverschiebungen führen. Der quadratische Chip minimiert den Fehler, da bei dieser Anwendung ein symmetrischer und homogener Brennfleck aufgenommen wird [21].

Die Kamera ermöglicht den Einsatz verschiedener Objektive und die Datenübertragung erfolgt über ein herkömmliches Netzkabel. Die Messung der Helligkeitsverteilung basiert auf die Ausgabe der Grauwerte aller Pixel.

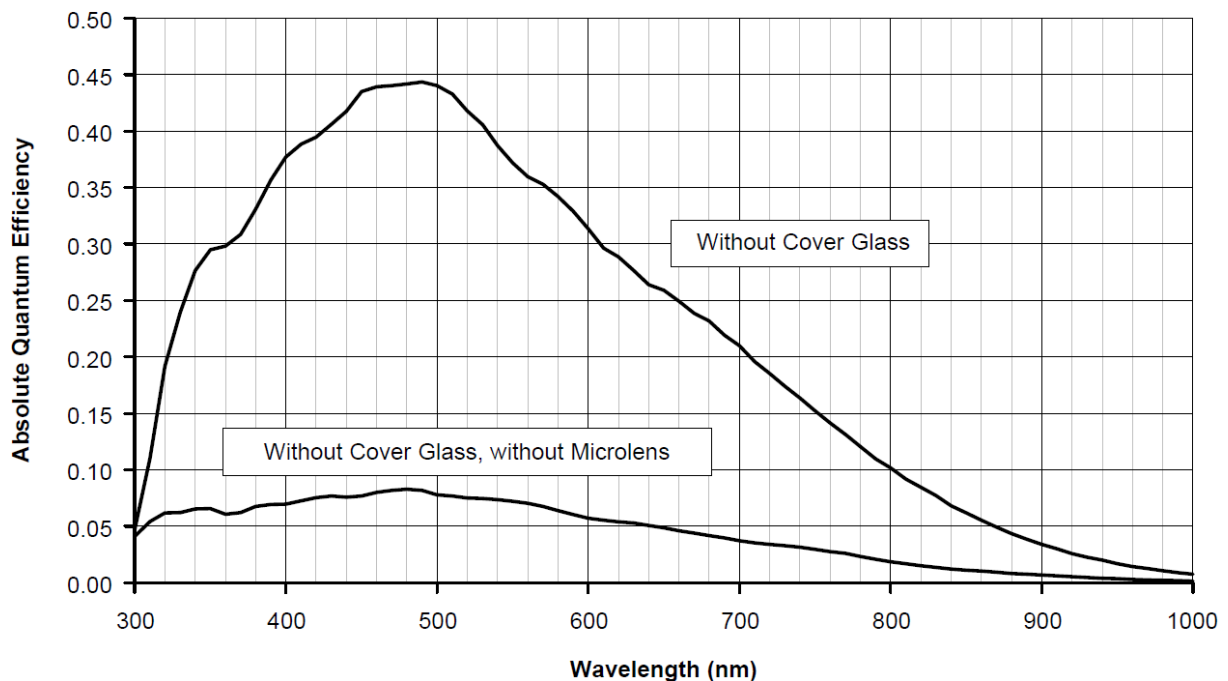


Abbildung 3.12. Monochrome Quanteneffizienz des CCD-Sensors vom Typ KAI-1020 [33].

3.1.5 Flux Mapping Acquisition System (FMAS)

Flux Mapping Acquisition System (FMAS) wurde beim DLR im Institut für Solarforschung entwickelt und ist eine in LabVIEW implementierte Software. Mit Hilfe von Bildentzerrungsmechanismen wird eine von einer Digitalkamera aufgenommene Helligkeitsverteilung einer flachen Referenzoberfläche in eine tabellarische Anordnung von Zahlen übersetzt. Diese Zahlen entsprechen den Grauwerten, die von den jeweiligen Pixeln des Lichtsensors registriert werden. Die Grauwerte können zwischen 0 und 255 liegen, wobei 0 am dunkelsten und 255 am hellsten ist [21]. Neben Bildentzerrungsmechanismen verfügt FMAS über verschiedene Bildoptimierungsfunktionen, die in folgendem Abschnitt näher beschrieben werden.

Bildoptimierungsfunktionen von FMAS

Bei Lichtsensoren oder Fotodioden ermöglicht die proportionale Umwandlung von einfallenden Photonen in elektrischen Ladungsträgern eine genaue Messung relativer Helligkeitsunterschiede. Allerdings können unbelichtete Fotodioden durch Temperatureinflüsse ebenfalls freie Ladungsträger erzeugen, die die relative Messung verfälschen würden. Eine sogenannte Dunkelstromkompensation sorgt für die richtige Ausgabe der abgedunkelten Pixel. Die Dunkelstromkompensation erfolgt bei verschlossener Kamera auf Betriebstemperatur, indem ein Bild aufgenommen wird und die abweichenden Grauwerte mit null korrigiert werden [21].

Ähnlich wie beim Dunkelstrom einer Fotodiode, können die Grauwerte eines gleichmäßig ausgeleuchteten Sensors geringfügig variieren. Dieser Effekt kann sogar auf das verwendete Objektiv zurückgeführt werden. Mit Hilfe der homogenen Ausleuchtung einer Ulbricht-Kugel wird eine Aussteuerung im oberen Drittel des Grauwertbereichs angestrebt. Anschließend werden die ausgegebenen Grauwerte kompensiert [21].

Eine weitere Funktion von FMAS ist die Kontrastverbesserung. Hierbei werden beleuchtete und unbeleuchtete Bereiche deutlich hervorgehoben, um die zu messende Strahlungsleistung einer konzentrierten Lichtquelle nicht zu verfälschen [21].

Eine der wichtigsten Mechanismen dieser Software ist die Bildentzerrung. Die für die Auswertung einer Messung relevante Flussdichteverteilung steht aus praktischen Gründen immer orthogonal zur Referenzoberfläche. Damit die Platzierung der Digitalkamera frei wählbar sein kann, muss die Software die mit der Platzierung verbundene geometrische Verzerrung des aufgenommenen Bildes korrigieren. Dazu muss der Benutzer bei jedem Versuchsaufbau die betrachtete Referenzfläche geometrisch definieren und im System hinterlegen. Die Referenzfläche wird durch vier Einmesspunkte und die Fläche des Radiometers durch eine sogenannte Pixelmatrix definiert [21].

Kalibrierung der Messdaten

Mit Hilfe der oben genannten Funktionen erzeugt FMAS ein hoch aufgelöstes Bild, das eine zweidimensionale Flussdichteverteilung qualitativ darstellt. Damit die Flussdichten den jeweiligen Grauwerten zugeordnet werden können, muss neben der Aufnahme eine räumlich definierte Flussdichtemessung durchgeführt werden. Diese Messung kann mittels eines Gardon-Radiometers erfolgen. Anschließend werden die optimierten Grauwerte mit der Radiometermessung und der festgelegten Pixelmatrix kalibriert. Daraus wird die Strahlungsleistung vom System ermittelt [21].

3.2 Qualitative Leistungsmessung mit FMAS

Zur Veranschaulichung des angewandten Messverfahrens wird der Verlauf einer qualitativen Leistungsmessung im folgenden Abschnitt beschrieben.

1. Das Target wird aufgebaut und die benötigten Strahler werden auf das geeignete Radiometer ausgerichtet.
2. Die Messkamera wird ohne Filter und mit der niedrigsten Blendzahl fokussiert.
3. Mit Hilfe der Aufnahmen werden die Einmesspunkte in FMAS festgelegt und die jeweiligen Abstände eingegeben.
4. Die benötigten ND-Filter werden angebracht und eine geeignete Blendzahl wird eingestellt.
5. Mit Hilfe der Messkamera und FMAS wird die Position der Strahler im laufenden Betrieb korrigiert.
6. Die benötigten Strahler werden eingeschaltet und nach einigen Minuten, wenn die Kurzbogenlampen ihre höchste Leuchtkraft entfaltet haben, werden Radiometermessungen durchgeführt.
7. Die Strahler werden ausgeschaltet und das Target wird waagerecht verschoben, bis das Radiometer komplett aus dem Fokus der Strahler ist.
8. Die Strahler werden erneut eingeschaltet und nach einigen Minuten wird die Messung der Helligkeitsverteilung auf der hochreflektierenden Fläche

des Targets mit FMAS und der monochromen CCD-Kamera durchgeführt.

9. Anschließend werden die verwendete Blendzahl und die vom Radiometer gemessene Flussdichte eingegeben, um die aufgenommenen Pixelwerte zu kalibrieren.

Das Grundprinzip der Messung kann auch geringfügig geändert werden, indem beispielsweise zuerst viele Radiometermessungen und anschließend die jeweiligen Leistungsmessungen durchgeführt werden. Auf diese Weise wird das Target nur einmalig verschoben und die benötigte Messzeit minimiert.

Minimierung der Messfehler

Während des Verlaufs einer qualitativen Leistungsmessung müssen folgende Punkte beachtet werden, um mögliche Fehlerquellen zu minimieren:

- Wenn das Target für die Radiometermessung fertig platziert wurde, sollte die Position auf dem Boden gekennzeichnet werden. Auf diese Weise kann die Messung wiederholt werden.
- Die Festlegung der Einmesspunkte und die Bestimmung der Abstände sollten möglichst genau sein, um die daraus errechnete Oberfläche der jeweiligen Pixel nicht zu verfälschen.
- Bei besonders stark fokussierenden Lichtquellen muss die sogenannte Pixelmatrix kleiner als die Fläche des Radiometers sein. Die Pixelmatrix in FMAS definiert die Oberfläche des Radiometers. Innerhalb dieser Fläche werden die Pixelwerte gemittelt.
- Nachdem die Einmesspunkte und die Pixelmatrix gesetzt wurden, sollte die Kamera möglichst nicht bewegt werden.
- Bei der Radiometermessung sollte die Wasserkühlung des Radiometers aktiv sein. Ohne die Kühlung werden die gemessenen Flussdichten niedriger. Außerdem könnte die Konstantanfolie durch hohe Temperaturen beschädigt werden.
- Wenn das Target nach der Radiometermessung verschoben wird, sollte der Abstand zum Strahler konstant bleiben, um die Geltung der Einmesspunkte nicht zu stören.

- Die Leistungsmessung bei FMAS sollte zwischen Pixelwerten von circa 100 und 180 erfolgen. Eine zu starke Ausleuchtung des Lichtsensors führt zur fehlerhaften Ladungsverschiebung der Pixel, wodurch manche Pixel heller erscheinen als sie tatsächlich sind. Allerdings ist die Auflösung der Messung niedriger, je weniger Pixelwerte vorhanden sind.

3.3 Auswertungsmethoden

Die im Rahmen dieser Arbeit aufgenommenen Messwerte werden zunächst mit den vorangegangenen Messungen verglichen. Die Gegenüberstellung der Daten soll einen Überblick über den Strahler verschaffen. Wenn die Werte tendenziell niedriger sind als erwartet, muss die gesamte Anlage vor der Hauptmessung nachjustiert werden. Erst wenn alle Werte einen akzeptablen Standard erreichen, werden weitere Messungen durchgeführt.

Visualisierung der Flussdichteverteilung

Die Visualisierung der Peakflussdichten wurden mit MATLAB programmiert. Das Programm erzeugt 149 gleichschenkelige Hexagone, die die Frontseite des Strahlers visualisieren. Anschließend wird die Messreihe zwischen null und eins normiert. Mittels der normierten Zahl und der Position des jeweiligen Strahlers werden die einzelnen Hexagone gefärbt. In Abhängigkeit zur Normierung wird eine Legende erzeugt.

Die Flussdichteverteilungen werden jeweils mit FMAS gemessen und als CSV Dateien gespeichert. Diese Dateien wurden im Rahmen dieser Arbeit mit MATLAB verarbeitet und grafisch dargestellt.

Histogramme und Normalverteilungen

Die Häufigkeit der Messwerte wird in 20 kW/m^2 Intervalle gezählt und durch die Gesamtheit geteilt. Auf diese Weise wird die relative Häufigkeit der betrachteten Abschnitte berechnet (siehe Anhang).

Die Normalverteilung setzt sich aus dem Median μ und aus der Standardabweichung σ der Messreihe zusammen. Der Median oder Zentralwert ist der mittlere Wert der Messreihe. Wenn die 149 Flusssichten nach ihrem Wert geordnet sind, ist dieser Zentralwert das arithmetische Mittel zwischen den Werten 74 und 75.

Die Standardabweichung errechnet sich aus der Messreihe A_1 bis N , der Anzahl N an Messwerten und aus dem Erwartungswert μ [35]

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |A_i - \mu|^2}. \quad (3.3.1)$$

Anschließend errechnet sich die Normalverteilung wie folgt [34]:

$$f(x|\sigma, \mu) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}. \quad (3.3.2)$$

Das Integral zwischen $-\infty$ und $+\infty$ dieser Normalverteilung ergibt eins. Beim Histogramm ergibt die Summe der relativen Häufigkeiten über die 20 kW/m² ebenfalls den Wert eins. Wird die Summe der relativen Häufigkeiten mit der Intervalllänge von 20 kW/m² multipliziert, resultiert der Flächeninhalt des Histogramms. Um die Normalverteilung exakt zu skalieren, muss die Normalverteilung mit folgendem Faktor multipliziert werden:

$$Faktor = 20 * \left(\int_{min}^{max} f(x|\sigma, \mu) dx \right)^{-1}. \quad (3.3.3)$$

Dabei wird durch das Integral der Normalverteilung zwischen min und max geteilt. Die Zahl min ist der niedrigste und die Zahl max der höchste Messwert der Messreihe. Auf diese Weise wird bei der Skalierung der Flächeninhalt der Normalverteilung innerhalb der Messreihe berücksichtigt.

Alle Messreihen und MATLAB-Skripte sind im Anhang B und D dokumentiert.

4 Ergebnisse

4.1 Vorangegangene Messungen

Die vorangegangenen Flussdichtemessungen der einzelnen Strahler wurden vor der Endmontage durchgeführt und sind in Abbildung 4.1 grafisch visualisiert. Die 149 Messungen wurden mit dem Radiometer der Seriennummer 10191 durchgeführt (siehe Tabelle 3.1) und die Werte liegen zwischen 81 und 247 kW/m².

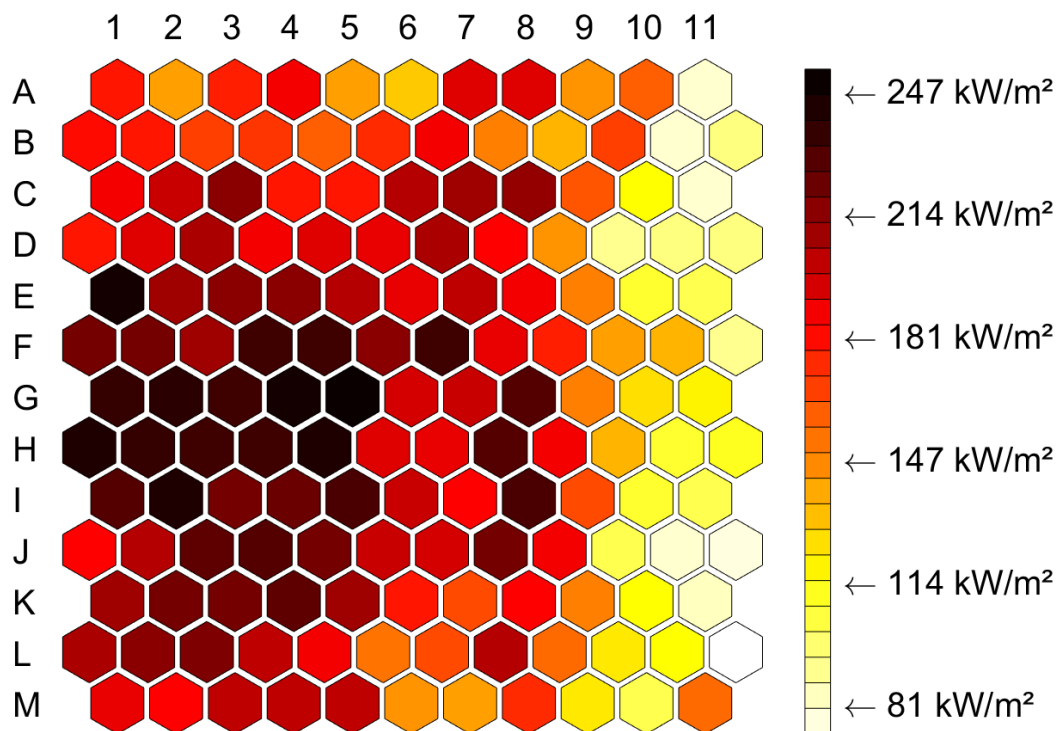


Abbildung 4.1. Vorangegangene Flussdichtemessung der einzelnen Strahler vor der Montage der Reflektoren.

Diese Messung fand nach der ersten Justierung der jeweiligen Strahler vor der Endmontage statt. Dabei wurden alle Strahler hängend gelagert und im laufenden Betrieb mit Hilfe einer Kamera und FMAS so gut wie möglich fokussiert und anschließend wurde für jedes Strahlermodul eine feste Position in der Anlage ausgewählt. Die Fokussierung der Strahler erfolgt mittels drei Verstellerschrauben

im hinteren Teil des Moduls, mit denen die Lampe innerhalb des Reflektors positioniert werden kann. Zusätzlich kann die Form des Reflektors plastisch verformt werden, bis der schärfste Fokus erreicht wird.

Die ersten Module wurden in den Reihen 11 und 12 angeordnet. Nach einigen justierten Strahlern wurde das Verfahren optimiert, was zu den deutlich höheren Maximalflussdichten führte. Tabelle 4.1 zeigt die absolute Häufigkeit der in Abbildung 4.2 dargestellten Messwerte, wobei die Abbildung das Histogramm und die angenäherte Normalverteilung der 149 vorangegangenen Flussdichtemessungen visualisiert. Nach der Justierung betrug der Zentralwert der Flussdichtemessung circa 188 kW/m^2 und die Standardabweichung 42 kW/m^2 .

Tabelle 4.1. Absolute Häufigkeit der 149 vorangegangenen Flussdichtemessungen vor der Montage der Reflektoren.

Flussdichte in kW/m^2	Strahler	Flussdichte in kW/m^2	Strahler
80 → 120	20	200 → 220	29
120 → 180	38	220 → 240	21
180 → 200	35	240 → 260	6

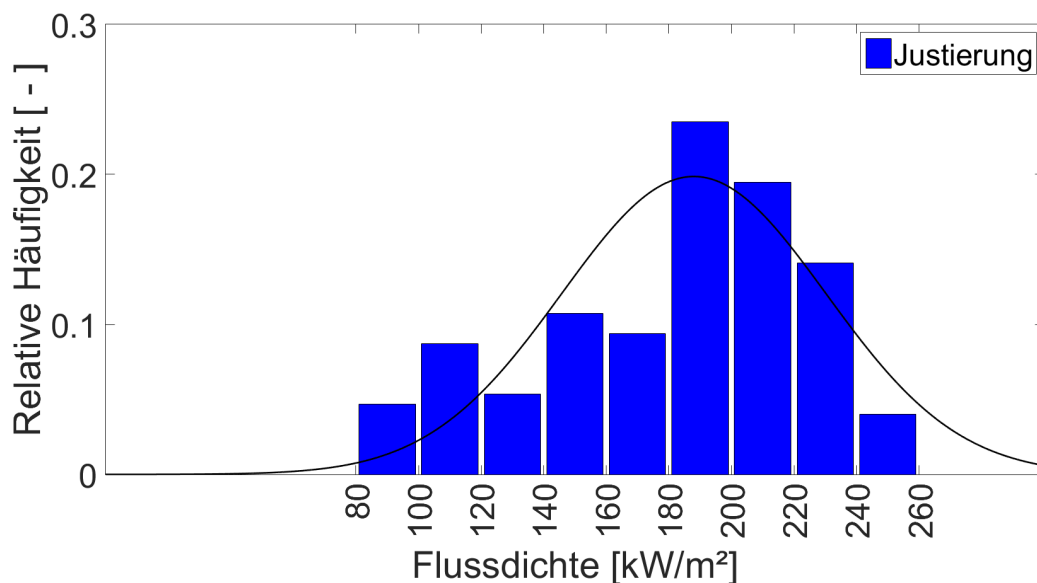


Abbildung 4.2. Histogramm und Normalverteilung der 149 vorangegangenen Flussdichtemessungen vor der Montage der Reflektoren.

Mit der gemessenen Flussdichte wurde anschließend die Strahlungsleistung über FMAS kalibriert. Die Strahlungsleistungen betrugen im Durchschnitt 2,5 kW wobei circa 6 % ultraviolette Strahlung, 30 % sichtbares Licht und der Rest infrarote Strahlung entsprechen (siehe Kapitel 2.2.1). Nach der Endmontage und der offiziellen Inbetriebnahme wurde die im nächsten Abschnitt beschriebene stichprobenartige Messung durchgeführt.

4.2 Stichprobenartige Messung in Versuchsraum 3

Im Versuchsraum 3 (Abbildung 1.2) wurde am 08.05.2017 eine stichprobenartige Peakflussdichtemessung mit dem Radiometer 10191 in den Spalten 1, 2 und 3 durchgeführt. Die gemessenen Flussdichten sind grafisch in Abbildung 4.3 dargestellt. Die Flussdichte der 25 Strahler lag zwischen 26 und 215 kW/m². Der Zentralwert dieser Messreihe betrug 115 kW/m² und die Standardabweichung 53 kW/m².

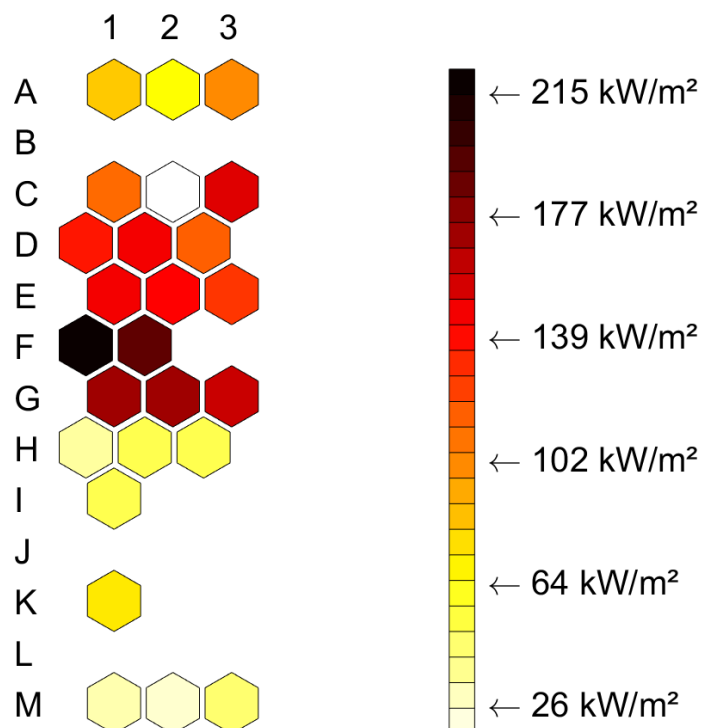


Abbildung 4.3. Ergebnisse der 25 stichprobenartig gewählten Strahler bei der Erstevaluierung am 08.05.2017.

Abbildung 4.4 zeigt das Histogramm und die Normalverteilung der 25 stichprobenartig gewählten Strahler bei der Erstevaluierung und bei der vorangegangenen Justierung. Der Zentralwert dieser Strahler betrug bei der Justierung 210 kW/m² und die Standardabweichung 24 kW/m².

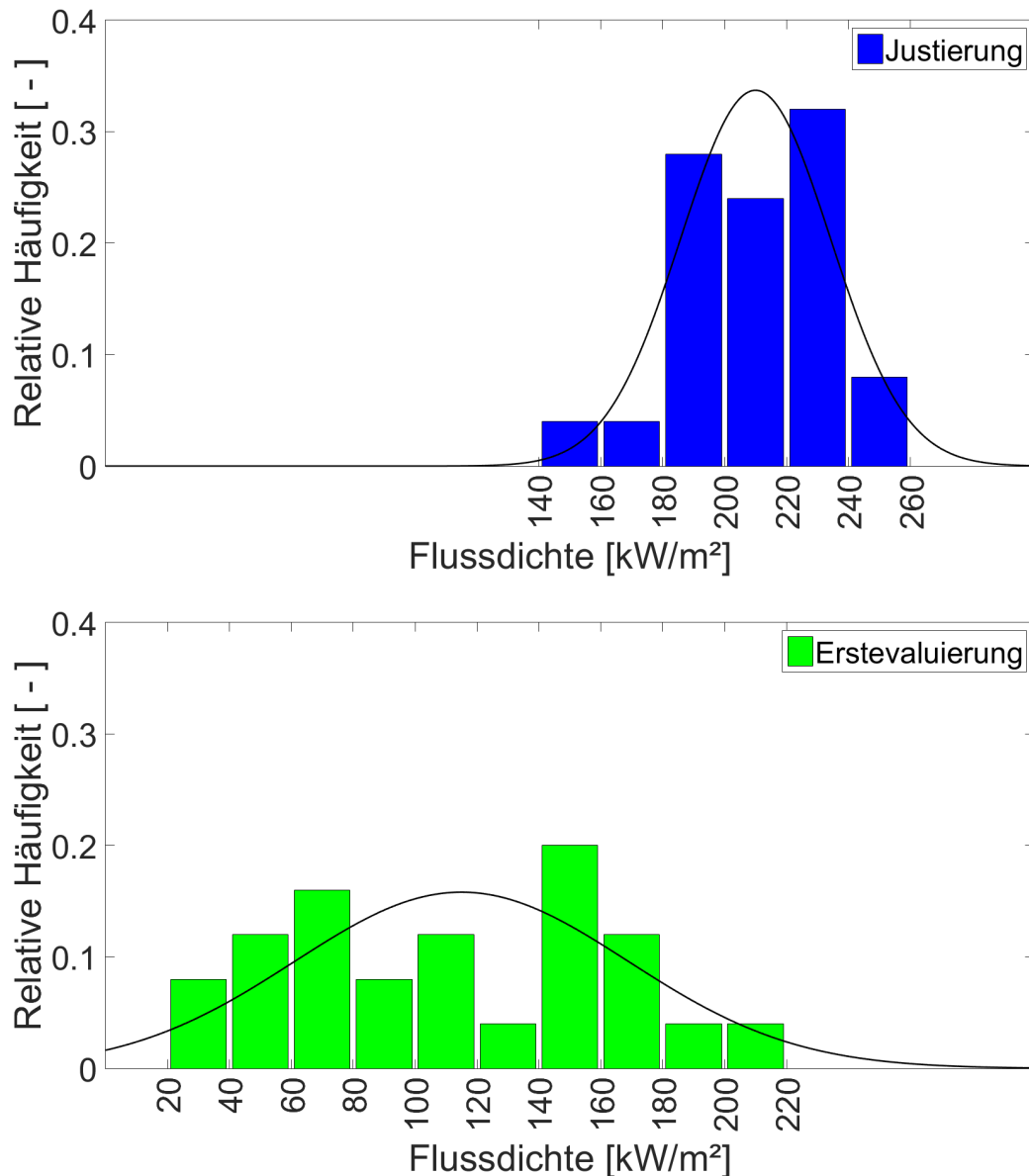


Abbildung 4.4. Histogramm und Normalverteilung der Flussdichten von 25 Stichproben bei der Justierung und bei der Erstevaluierung.

Der Zentralwert der Erstevaluierung ist circa 1,8 mal niedriger und die Standardabweichung circa 2,2 mal höher als die der vorangegangenen Messwerte. Die

relativ hohe Standardabweichung der Erstevaluierung verweist auf eine starke Streuung der neu gemessenen Flussdichten. Die Streuung ist hauptsächlich aufgrund der tendenziell niedrigen Flussdichten unterhalb der G Reihe (Abbildung 4.3). Die Tendenz der im Vergleich niedrigen Flussdichten zeigt, dass die Lagerung der Strahler offenbar eine Auswirkung auf die Position des Brennpunktes hat. Allerdings fielen auch die übrigen Flussdichten der Erstevaluierung niedriger als erwartet aus. Dies kann auf die mechanischen Belastungen während der Montagearbeiten oder auf vereinzelte Fehlfunktionen der Steuerung zusammen mit der engen Anordnung der Strahler zurückgeführt werden. Hinzu kommt der starke Einfluss des Einfallswinkels auf die gemessene Flussdichte. Dieser Effekt spielt eine wichtige Rolle bei der Analyse der Gesamtanlage und wird in den folgenden Abschnitten näher behandelt.

4.3 Nachjustierung der montierten Strahler

Die auffällig niedrigen Flussdichtemesswerte aller Reihen unterhalb von G erforderten eine komplette Nachjustierung der stehend gelagerten Strahler. Analog zur ersten Justierung wurden die Strahler im laufenden Betrieb händisch verformt und die Position des Brennpunkts durch die Einstellung der drei Verstell-schrauben korrigiert.

Bei der Nachjustierung waren vier Personen beteiligt. Zwei kümmerten sich um die Positionierung der Strahler unter Einhaltung der Brennweite von 8 m, um die manuelle Freigabe des Stromanschlusses und um die Steuerung der Lichtquelle. Die weiteren zwei waren für die Fokussierung der jeweiligen Strahler und die Ermittlung der gemessenen Flussdichten zuständig. Abbildung 4.5 zeigt die Nachjustierarbeiten drei verschiedener Strahler mit Hilfe einer Hebebühne, einer Messkamera und FMAS (siehe auch Anhang A.3).

Die Nachjustierung basierte hauptsächlich auf der mit der Kamera aufgenommenen Projektion des jeweiligen Strahlermoduls. Angestrebt wurden die Werte der ersten Justierung unter Berücksichtigung der Abschwächung durch schräge Einfallswinkel, auch Cosinus-Effekt genannt.

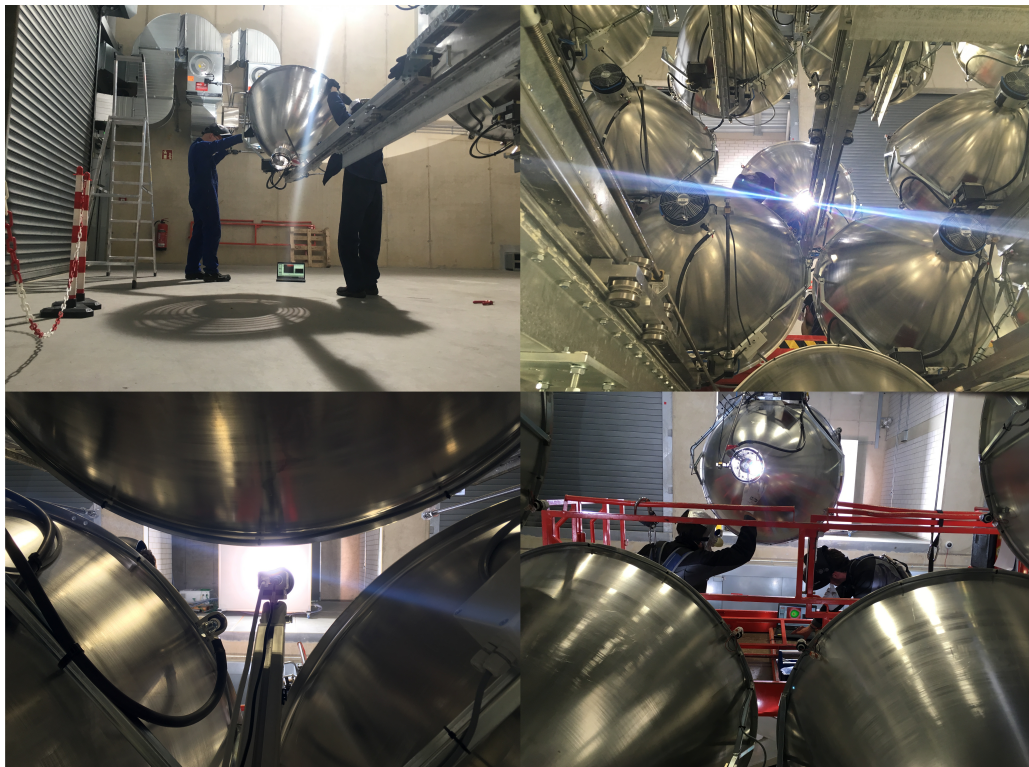


Abbildung 4.5. Nachfokussierung aller Strahler im laufenden Betrieb mit Hilfe einer CCD-Kamera, FMAS und einer Hebebühne.

Eine besonders hohe Steigerung der Flussdichteverteilung konnte beispielsweise beim Strahler H1 beobachtet werden. Qualitativ wurden im Laufe des Projekts folgende Peakflussdichten von H1 ermittelt:

- nach der ersten Justierung: 240 kW/m^2 ,
- nach der Montage: 46 kW/m^2 ,
- nach Einstellung der Verstellerschrauben: 196 kW/m^2 und
- nach der mechanischen Korrektur der Reflektorform: 209 kW/m^2 .

H1 zeigte bereits nach der ersten Justierung eine überdurchschnittliche Peakflussdichte von 240 kW/m^2 . Die stehende Lagerung des Moduls nach der Montage bewirkte eine signifikante Verschiebung des Brennpunktes. Außerdem lag der Einfallswinkel des Lichtstrahls zur Normalen in etwa bei $12,6^\circ$. Dadurch resultierte nach der Montage eine verhältnismäßig niedrige Peakflussdichte von 46 kW/m^2 , die während der Erstevaluierung ermittelt wurde (siehe auch Abbildung 4.3). Da die Form des Reflektors in diesem Fall nahe zu unversehrt

blieb, konnte durch Neueinstellung des Brennpunktes eine Peakflussdichte von 196 kW/m^2 erreicht werden. Anschließend wurde durch händische Verformung des Strahlers eine Flussdichte von 209 kW/m^2 erreicht. Die Flussdichte wurde durch die Nachjustierung um den Faktor 4,54 gesteigert. Allerdings konnten die Verluste durch den schrägen Einfallswinkel nicht kompensiert werden. Abbildung 4.6 zeigt einen direkten Vergleich der Flussdichteverteilung bei H1 während der Erstevaluierung (links) und nach der Nachjustierung (rechts). Die gleichbleibende Skalierung der Achsen auf der Abbildung macht die Steigerung nach der zweiten Justierung deutlich sichtbar.

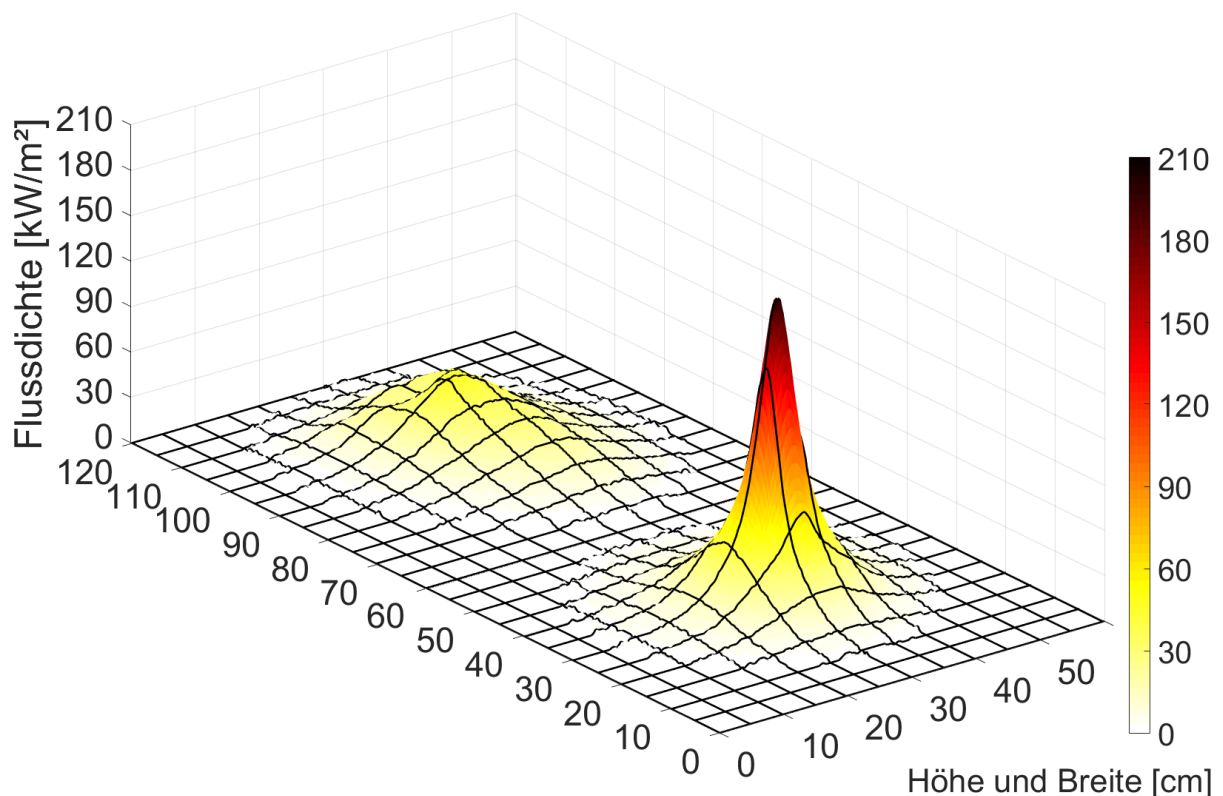


Abbildung 4.6. Flussdichteverteilung vom Strahler H1 nach der Montage (links) und nach der zweiten Justierung (rechts).

Die Strahlungsleistung des Strahlermoduls H1 ergab folgende Werte:

- nach der ersten Justierung: 2,66 kW,
- nach der Montage: 2,45 kW und
- nach der zweiten Justierung: 2,77 kW.

In diesem Fall betrugen die Schwankungen der gesamten Strahlungsleistung 100 W. Nach der zweiten Justierung hatte die Leistungsmessung relativ hohe Pixelwerte. Eine Verstärkung der gemessenen Strahlungsleistung wird vermutlich durch eine von benachbarten Strahlern bewirkte Bündelung der Streustrahlung verursacht. Zusätzlich kann die geometrische Definition der Abstände in FMAS durch frei wählbare Einmesspunkte zu einer geringfügigen Verzerrung der betrachteten Oberflächen führen.

4.4 Auswertung der nachjustierten Strahler

Analog zu H1 wurden alle restlichen Strahler nachjustiert und anschließend die jeweiligen Peakflussdichten bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.7 aufgeführt und farblich gekennzeichnet. Die während der Nachjustierung gemessenen Flussdichten liegen zwischen 72 und 231 kW/m². Die theoretische Normalverteilung der Messreihe hat einen Zentralwert von 152 und eine Standardabweichung von 35 kW/m².

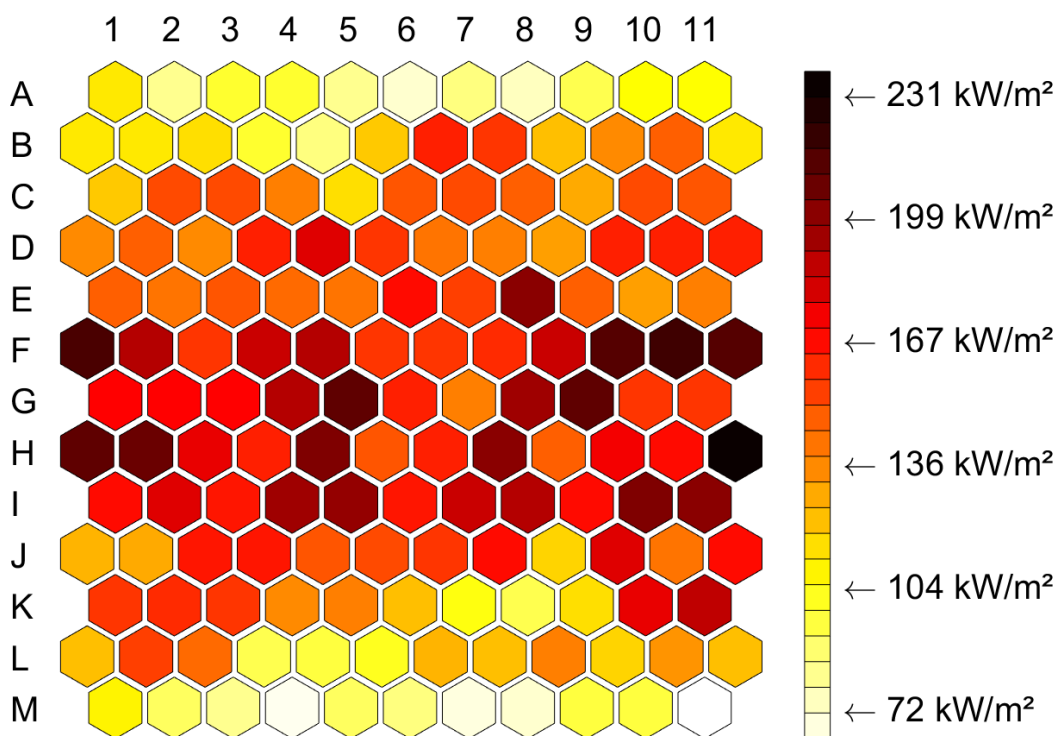


Abbildung 4.7. Überblick über alle nachjustierten Strahler am 23.06.2017.

Die absolute Häufigkeit der Messwerte ist in Tabelle 4.2 dargestellt, wobei die höchste Flussdichte 231 kW/m^2 betrug. Dieser Wert wurde beim Strahlermodul H12 gemessen. Das Histogramm mit den relativen Häufigkeiten und die theoretische Normalverteilung sind in Abbildung 4.8 dargestellt.

Tabelle 4.2. Absolute Häufigkeit der 149 Flussdichten nach der Nachjustierung.

Flussdichte in kW/m^2	Strahler	Flussdichte in kW/m^2	Strahler
60 → 100	14	160 → 180	33
100 → 120	18	180 → 200	15
120 → 140	19	200 → 220	11
140 → 160	38	231	1

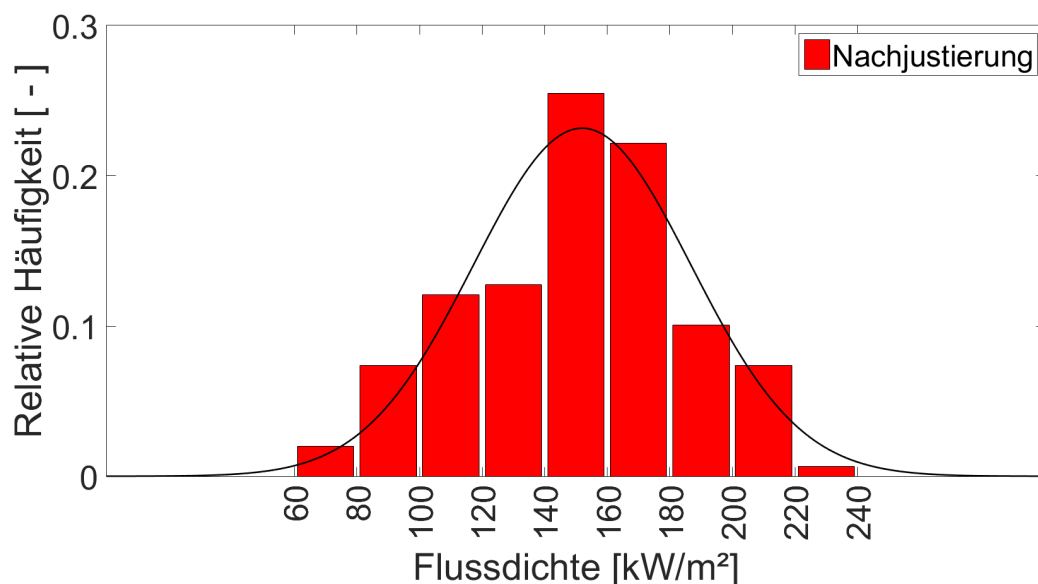


Abbildung 4.8. Histogramm und Normalverteilung der 149 Flussdichten nach der Nachjustierung.

Ein Vergleich der 25 Stichproben bei der Erstevaluierung und nach der Nachjustierung zeigt eine deutliche Steigerung des Zentralwerts und eine erhebliche Minderung der Standardabweichung (Abbildung 4.9). Der Zentralwert der 25 nachjustierten Stichproben betrug 152 kW/m^2 und die Standardabweichung 35 kW/m^2 . Im Vergleich zur Erstevaluierung wurde eine Steigerung des Zentralwerts um den Faktor 1,3 und eine Minderung der Standardabweichung um den Faktor 1,5 erzielt.

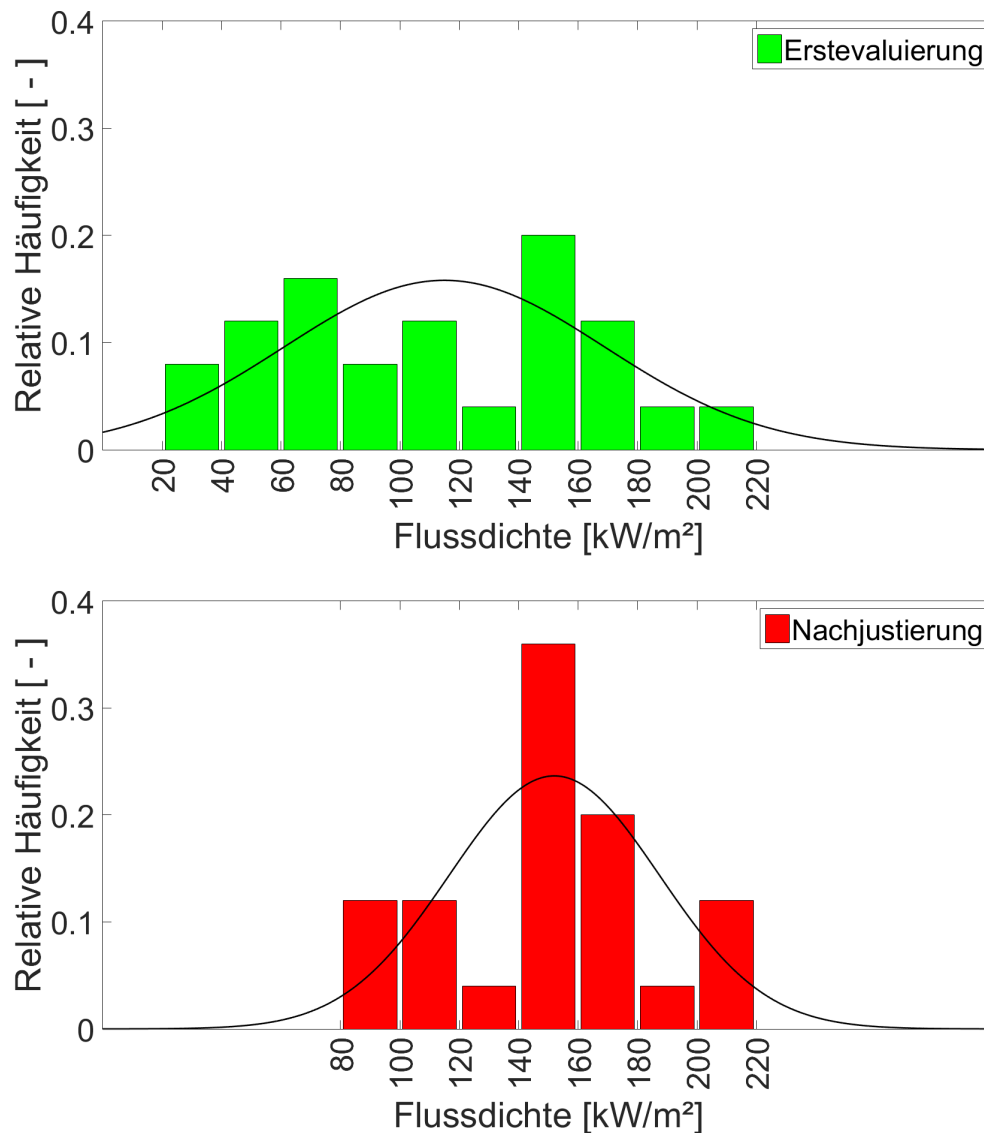


Abbildung 4.9. Histogramm und Normalverteilung der Flussdichten von 25 Stichproben bei der Erstevaluierung und bei der Nachjustierung.

Bis auf wenige Ausnahmen wurden aus praktischen Gründen die einzelnen Messungen in folgenden Versuchsräumen durchgeführt:

- Versuchsraum 1 → Spalten 10, 11 und 12.
- Versuchsraum 2 → Spalten 4, 5, 6, 7, 8 und 9.
- Versuchsraum 3 → Spalten 1, 2 und 3.

Unter Berücksichtigung der Versuchsräume zeigt Abbildung 4.7 besonders niedrige Flussdichten bei stark geneigten Strahlermodulen. Der Einfluss des Einfallswinkels zur Flächennormalen kann durch die natürliche Streuung der Messwerte erst mit hinreichend vielen Messungen gezeigt werden. Die Korrelation wird in Abbildung 4.10 dargestellt.

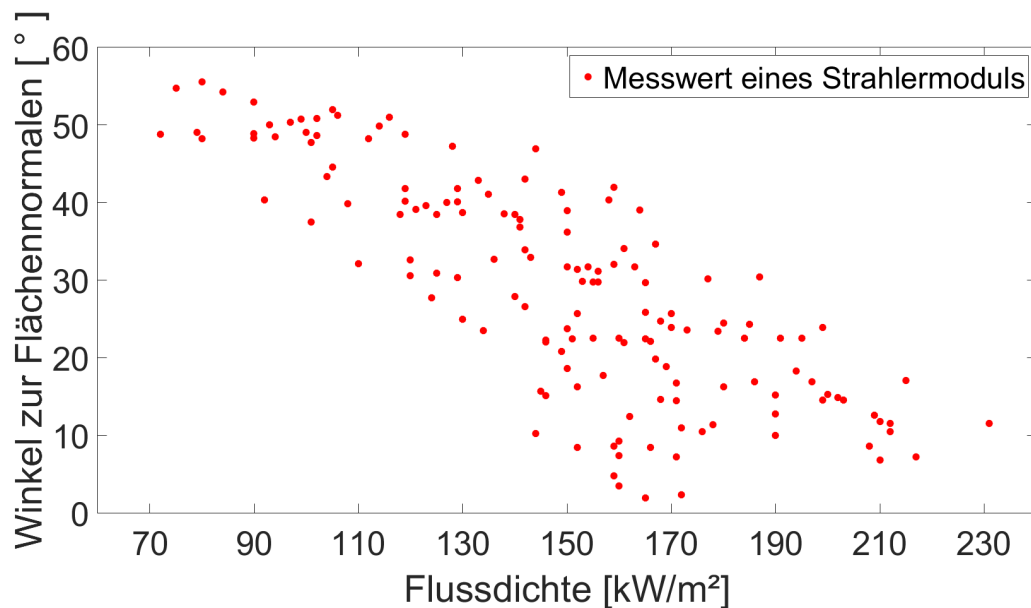


Abbildung 4.10. Nachjustierte Flussdichten in Bezug auf den Einfallswinkel zur Flächennormalen.

Die Peakflussdichte einer fokussierten Projektion bleibt innerhalb der Radiometeroberfläche weitgehend konstant bei einer senkrecht einfallenden Strahlungsquelle. Das Radiometer ist mit seinem hohen Absorptionsgrad annähernd wie ein schwarzer Körper, der die einfallende Strahlung vollständig absorbiert. Die im Strahlengang projizierte Fläche des Radiometers wird durch den schrägen Einfallswinkel der Strahlungsquelle verkleinert und folglich werden weniger Lichtstrahlen vom Messwandler erfasst. Aus diesem Grund wird eine im Vergleich zur senkrecht einfallenden Strahlungsquelle niedrige Peakflussdichte gemessen. Wenn der Messwandler bündig mit der Oberfläche des Targets angebracht wäre, würde die im Strahlengang projizierte Oberfläche des Radiometers und die gemessene Peakflussdichte mit dem Cosinus des Winkels zur Flächennormalen abnehmen. Allerdings ist das Radiometer ein bis zwei Millimeter hinter der Oberfläche des Targets, wodurch die angestrahlte Fläche stärker reduziert

wird. Die Abbildung 4.11 zeigt die im jeweiligen Strahlengang projizierten Flächen des Radiometers A1, A2 und A3.

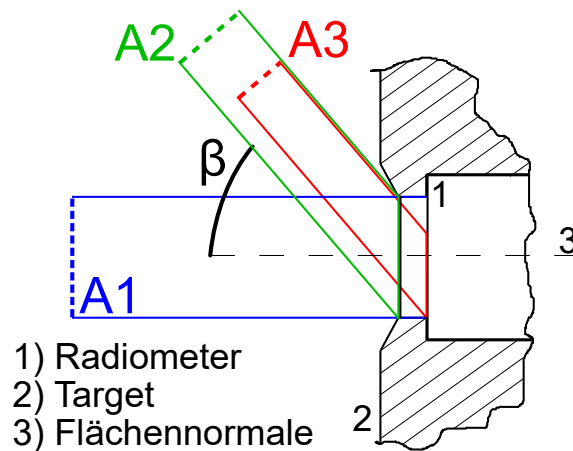


Abbildung 4.11. Schnittdarstellung des Targets mit dem Radiometer und den im jeweiligen Strahlengang projizierten Flächen A1, A2 und A3.

Bei einer mit dem Winkel β einfallenden Strahlrichtung wird die im Strahlengang projizierte Fläche A2 mit dem Faktor $\cos\beta$ reduziert. Auf dieselbe Weise wird unter Berücksichtigung der Lambertschen Gesetze die senkrecht gemessene Peakflussdichte um den Faktor $\cos\beta$ niedriger (siehe Kapitel 2.1.3).

Die im Strahlengang projizierte Oberfläche des Radiometers A3 ist kleiner als $A2 = A1 * \cos\beta$, wenn das Radiometer einige Millimeter hinter der Oberfläche des Targets ist. Die zusätzliche Reduzierung der Fläche wird teilweise durch eine partielle Reflexion der Strahlung an den Seiten der Bohrung kompensiert. Dadurch wird eine exakte Umrechnung der gemessenen Peakflussdichten erschwert. Wenn die Einfallswinkel der Strahler nicht zu hoch sind, kann der Cosinus des Winkels zur Flächennormalen eingesetzt werden, um die senkrechten Peakflussdichten zu berechnen. Diese errechneten Flussdichten können anschließend mit Hilfe eines neuen Winkels umgerechnet werden und damit können folglich approximierte Prognosen erstellt werden. Der Cosinus des Winkels zur Flächennormalen wird mit der Gleichung 3.1.8 folgendermaßen berechnet:

$$\cos\beta = h/r = \sqrt{r^2 - (s_y - f_y)^2 - (s_z - f_z)^2} r^{-1}. \quad (4.4.1)$$

4.5 Strahlergruppierungen

Die Evaluierung der Strahlergruppierungen startete unmittelbar nach der vollständigen Nachjustierung des Strahlers. Zunächst wurden 121 Strahler auf den zweiten Versuchsraum mit Hilfe des mathematischen Modells fokussiert. Da der Messpunkt des Targets höher war als der Auslegungszielpunkt, konnten die Strahlermodule F4, F5, F8 und F9 aus Bauraumgründen nicht auf das Ziel ausgerichtet werden. Abbildung 4.12 zeigt die errechneten Flussdichten der 117 ausgerichteten Strahler.

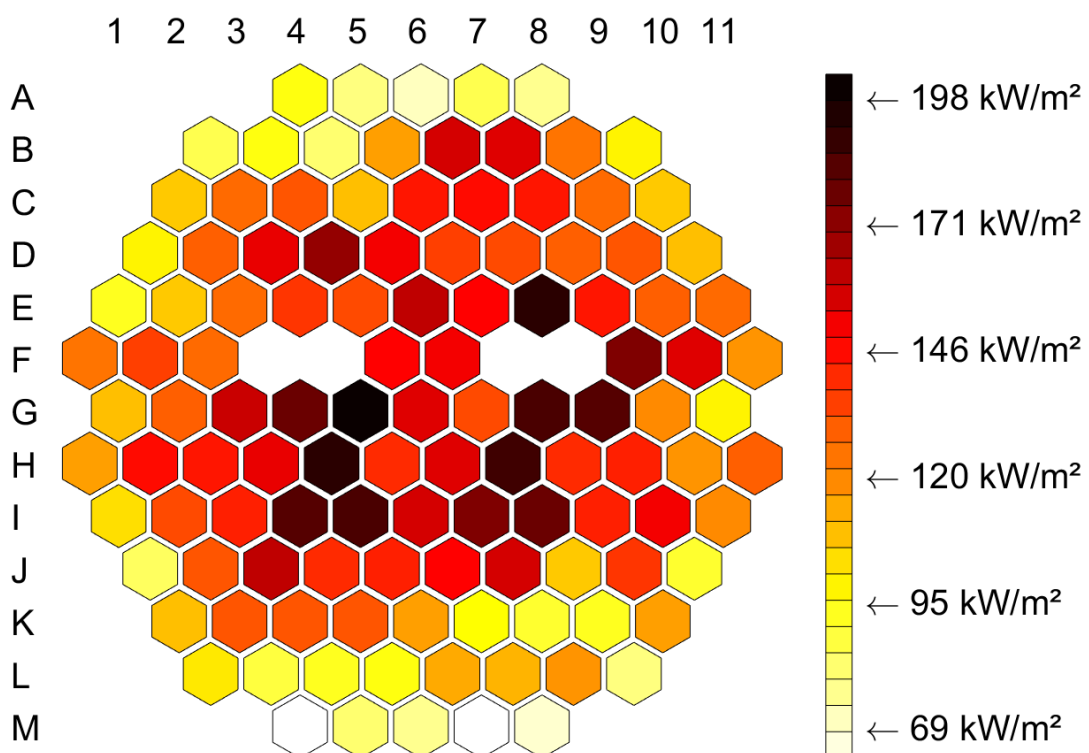


Abbildung 4.12. Flussdichte der 117 Strahler.

Vor der Hauptmessung wurden die Radiometer von der Arbeitsgruppe des Sonnenofens am Standort Köln-Porz mit Hilfe eines Kendall-Radiometers kalibriert. Das Radiometer 10191 wurde bei der Kalibrierung um den Faktor 0,945 korrigiert. Für die Prognose der Flussdichte der Strahlergruppierungen wurden die Werte ebenfalls mit dem Faktor 0,945 korrigiert. Zunächst wurde die Hauptgruppe in fünf kleine Gruppierungen zerlegt. Die Gruppierungen wurden mit Hilfe der prognostizierten Werte ausgewählt, indem die erwarteten Flussdichten im Bereich von 2.400 und 3.600 kW/m² lagen.

Die Messungen der Gruppenflussdichten wurden mit dem Radiometer 10192 durchgeführt. Der Messbereich lag zwischen 0 und 4.155 kW/m^2 und konnte bei den Gruppierungen zwischen 50 % und 85 % ausgelastet werden. Dadurch fielen die Messwerte etwas genauer aus. Abbildung 4.13 zeigt exemplarisch die Flussdichteverteilung von 33 außenliegenden Strahlern und einer Peakflussdichte von 3.573 kW/m^2 . Der überdurchschnittliche Durchmesser der Projektion betrug circa 30 cm und ist auf die hohen Einfallswinkel zurückzuführen.

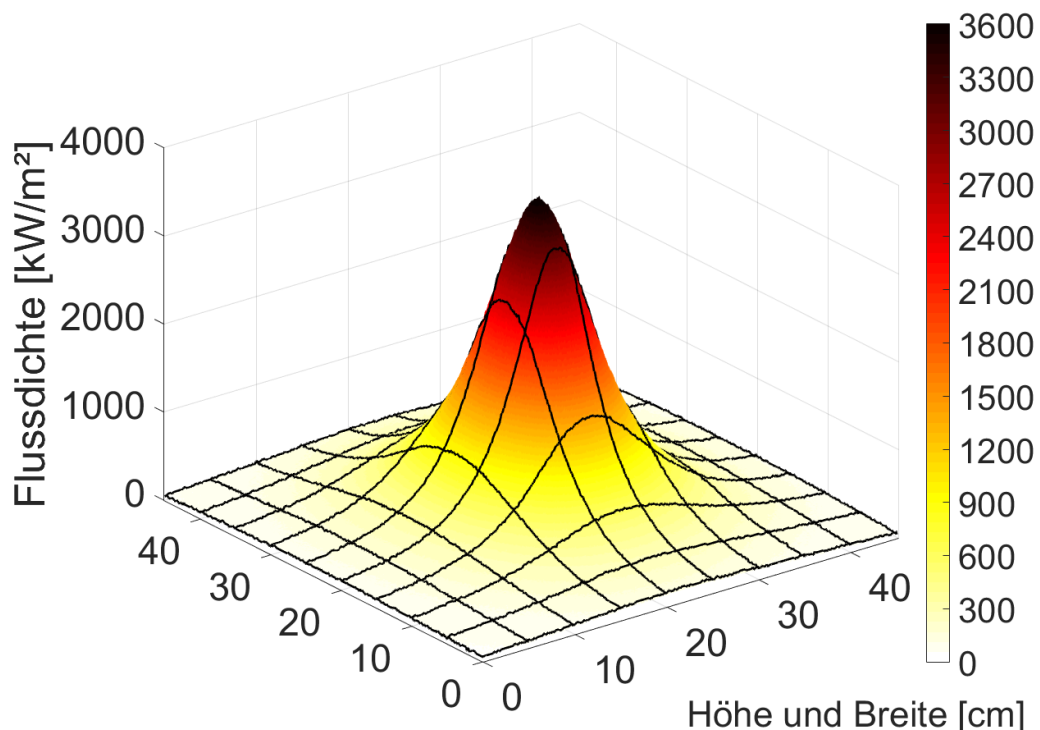


Abbildung 4.13. Flussdichteverteilung von 33 äußeren Strahlern.

Die Gesamtstrahlungsleistung betrug 91 kW. Im Durchschnitt hatten die jeweiligen Strahler eine Strahlungsleistung von 2,76 kW und liegen innerhalb des erwarteten Bereichs. Die anderen vier Gruppierungen wurden ebenfalls vermessen und lieferten folgende Werte (Tabelle 4.3).

Tabelle 4.3. Zerlegung der Hauptgruppierung in fünf Gruppierungen.

	Nr. 1 Mittig	Nr. 2 Links	Nr. 3 Rechts	Nr. 4 Außenring	Nr. 5 Mitte
Peakflussdichte [kW/m^2]	2.751	2.493	2.630	3.573	3.021
Anzahl der Strahler [-]	19	20	20	33	25
Gesamtleistung [kW]	49	55	56	91	71
Durchschnittlich [kW]	2,58	2,75	2,80	2,76	2,84

4.6 Hauptmessungen

Die Hauptmessung war eine quantitative Leistungsmessung, wie im Kapitel 3.2 beschrieben. Eingesetzt wurde das Radiometer mit der Seriennummer 10193 (siehe Tabelle 3.1). Der Messbereich dieses Radiometers streckt sich zwischen 0 und 8.536 kW/m^2 . Der Spannungsbereich von 0 bis 10 mV kann bis 15 mV gesteigert werden, wodurch eine Flussdichte von bis zu 12.804 kW/m^2 gemessen werden kann. Ab 15 mV verhält sich die Thermospannung nicht mehr linear zur Temperatur (siehe Kapitel 3.1.1). Bei einer Superpositionierung der gemessenen Flussdichten nach der Nachjustierung unter Berücksichtigung der neuen Einfallswinkel zur Flächennormalen ergibt sich eine Gesamtflussdichte von bis zu 15.000 kW/m^2 . Aus diesem Grund muss die Peakflussdichte der Hauptgruppe durch verschiedene Gruppenmessungen ermittelt werden.

Zunächst wurde die Hauptgruppe in zwei Gruppierungen geteilt. Die untere Hälfte bestand aus 55 Strahlern zwischen H und M und die obere Hälfte aus 62 Strahlern zwischen A und G. Mit dem Radiometer 10193 betrug die Flussdichte der oberen Hälfte 7.879 kW/m^2 und die der unteren Hälfte 6.684 kW/m^2 . Die fünf Flussdichten in der Tabelle 4.3 wurden mit dem Radiometer 10192 und die Flussdichten der Strahler wurden mit dem Radiometer 10191 gemessen. Durch Addition dieser Messreihen kann die Hauptflussdichte ermittelt werden. Die Tabelle 4.4 zeigt die Superpositionierung der Messreihen. Durch den Einsatz drei verschiedener Messwandler wird die Sicherheit der Messung erhöht. Die Abweichung der Summen beträgt zwischen den Radiometern 10192 und 10193 weniger als 1 %. Allerdings weicht die Summe der einzelnen Flussdichten um circa 5 % ab.

Tabelle 4.4. Ermittlung der Hauptflussdichte.

Radiometer	Flussdichte der Strahlergruppierungen in kW/m ²
10191	Arithmetische Summe aller einzelnen Flussdichten = 15.274 Arithmetische Summe der Teilgruppen = 14.468 Arithmetische Summe der Horizontalhälften = 14.563
10192	
10193	

Da die Qualität der Messwerte der Gruppierungen höher war als die einzelnen Flussdichtemessungen, wurde eine Flussdichte von 14.500 kW/m² angenommen. Anschließend wurde das Target unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.2 beschriebenen Hinweise verschoben und die Hauptmessung konnte stattfinden. Abbildung 4.14 zeigt die kalibrierte Flussdichteverteilung mit einer Gesamtleistung von 330 kW. Unmittelbar vor der Messung fiel der Strahler C9 aus und musste bei der Ermittlung der Flussdichte berücksichtigt werden.

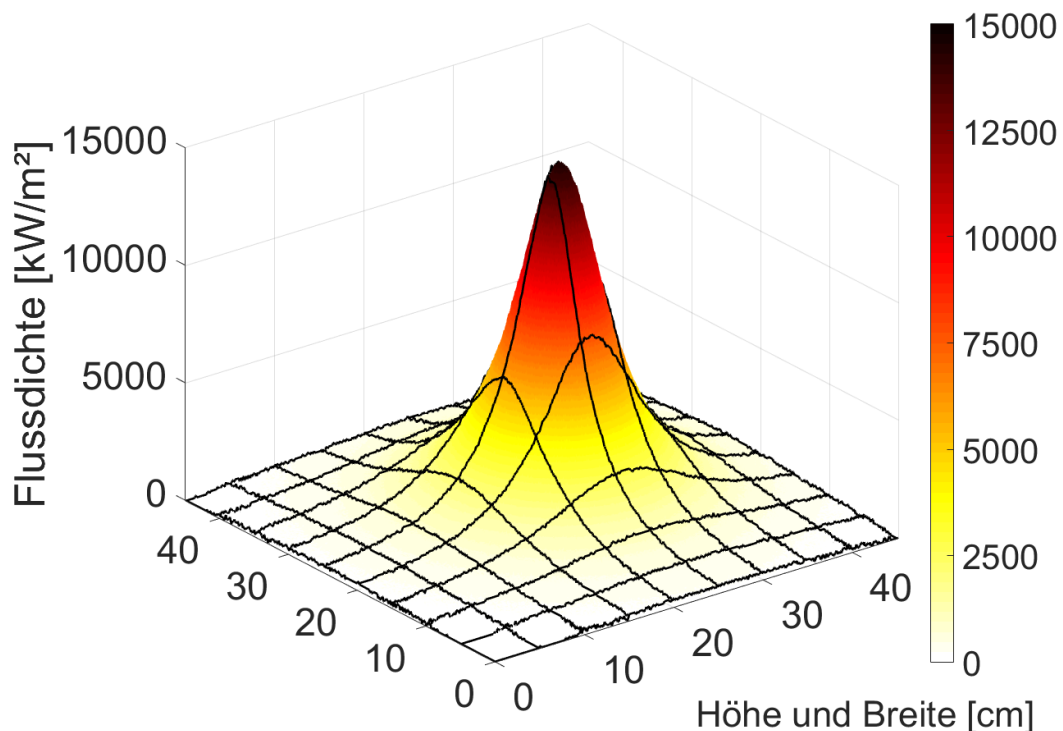


Abbildung 4.14. Flussdichteverteilung von 116 Strahlern.

Die Pixelwerte gingen bei dieser Messung bis 200 und dadurch wurde der Lichtsensor leicht überbelichtet. Die Höhe der Pixelwerte führt in diesem Fall zu

einem leichten Anstieg der Gesamtleistung, aufgrund fehlerhafter Ladungsver-schiebungen beim Auslesen der Pixel. Im Durchschnitt betrug die Leistung der einzelnen Strahler 2,8 kW und liegt damit im erwarteten Bereich.

Die Tabelle 4.5 zeigt eine Übersicht über alle durchgeführten Hauptmessungen. Bei der zweiten Hauptmessung waren die Strahler nicht auf einem Punkt fokus-siert und erzeugten dadurch im Vergleich zur ersten Messung einen größeren Brennfleck mit einer niedrigeren Peakflussdichte. Die Pixelwerte bei der zweiten Messung waren knapp unter 200, wodurch die Leistungsmessung im Durch-schnitt niedriger ausgefallen ist. Die linke und die rechte Seite verfügten über 96 Strahler und hatten Flussdichten zwischen 9.900 und 10.200 kW/m². Die Gesamtstrahlungsleistung betrug in beiden Fällen circa 240 kW und im Durch-schnitt 2,5 kW pro Strahler.

Tabelle 4.5. Hauptmessungen.

	Flussdichte in kW/m ²	Strahler	Strahlungsleistung kW	Pro Strahler kW
Hauptmessung 1	14.500	116	330	2,8
Hauptmessung 2	12.506	116	316	2,7
Linke Seite	9.967	96	241	2,5
Rechte Seite	10.120	96	240	2,5

Für die Gesamtleistung ist die Peakflussdichte weniger von Bedeutung. Viel mehr ist für spätere Bestrahlungsversuche eine homogene Flussdichtevertei-lung über eine diskrete Fläche wichtig.

Um diese Ergebnisse zu veranschaulichen wird folgendes Beispiel vorgestellt: Die Sonne hat eine Strahlungsleistung von $3,835 \cdot 10^{26}$ W. Auf der Erde wird eine extraterrestrische Bestrahlungsstärke von 1.367 W/m² registriert bei einer Ent-fernung von $149,6 \cdot 10^6$ km oder 499 Lichtsekunden vom Sonnenmittelpunkt. Ei-ne Bestrahlungsstärke von 14,5 MW/m² wird bei einer Entfernung von $1,45 \cdot 10^6$ km oder 4,8 Lichtsekunden zum Sonnenmittelpunkt erreicht. Diese Entfernung entspricht in etwa ein Hundertstel der Entfernung der Erde zum Sonnenmittel-punkt. Im Vergleich dazu beträgt der Radius der Sonne circa 2,3 Lichtsekunden.

5 Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde ein indirektes Messverfahren zur Bestimmung der Flussdichteverteilung umgesetzt. Für die Messung wurde die Software Flux Mapping Acquisition System (FMAS), zusammen mit einer monochromen Kamera und einem Gardon-Radiometer verwendet. Die Bestrahlungsebene bestand aus einem eigens konstruierten, wassergekühlten und hochreflektierenden Aluminiumtarget, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde. Das Target wurde beweglich gelagert und die Wasserleitungen ermöglichen die Selbstentleerung für einen einfachen Transport. Die jeweiligen Strahler wurden nach der Montage nachjustiert und anschließend für die Hauptmessung mit Hilfe eines mathematischen Modells ausgerichtet.

Die Hauptmessung ergab eine Peakflussdichte von 14.500 kW/m^2 und eine Gesamtstrahlungsleistung von 330 kW . Damit wurde die erwartete Peakflussdichte von 11.000 kW/m^2 übertroffen und die Gesamtleistung lag im erwarteten Bereich von $2,5$ bis $2,8 \text{ kW}$ pro Strahler. Der Einsatz von 96 Strahlern erzeugte Strahlungsleistungen von circa 240 kW und mit einem Durchschnitt von $2,5 \text{ kW}$ pro Strahler lag dies über dem erwarteten Wert.

FMAS zeigte in Synlight bei Pixelwerten zwischen 100 und 180 sehr ähnliche Messgrößen pro Strahler, wie die am Hochleistungsstrahler am Standort Köln Porz. Allerdings fiel die Strahlungsleistung bei höheren Pixelwerten höher als erwartet aus. Die Genauigkeit der Messreihen muss durch wiederholte Messungen verbessert werden. Zusätzlich sollten alternative Messmethoden eingesetzt werden, um die vorliegenden Ergebnisse zu überprüfen.

Die Flussdichten können jeweils aufaddiert werden, um neue Flussdichten zu prognostizieren, vorausgesetzt, dass die Messbedingungen dieselben sind. Die Umrechnung der Flussdichten mit Hilfe des Cosinus des einfallenden Winkels zur Flächennormalen ist bei großen Winkeln nicht wirksam und sollte nur als eine Approximation verwendet werden. Die Addition der Gesamtstrahlungsleistung der jeweiligen Strahler kann für Prognosen ohne Einschränkungen verwendet werden.

A Anhang: Bilder des Strahlers



Abbildung A.1. Das Synlight-Gebäude.

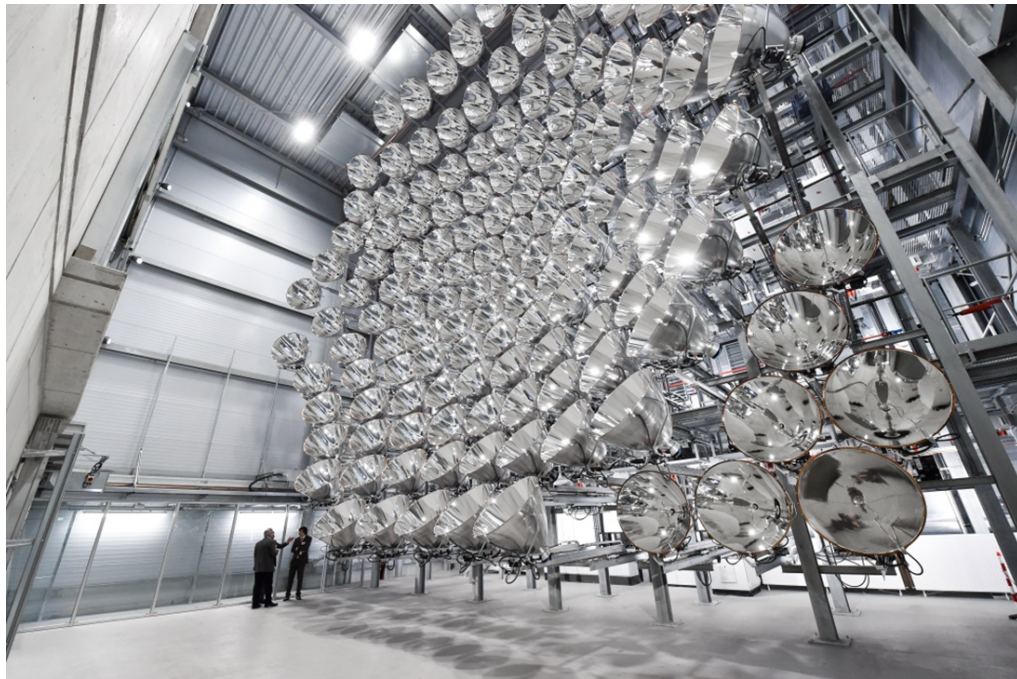


Abbildung A.2. Kugelförmige Struktur der 121 im Versuchsraum 2 ausgerichteten Strahlermodule.



Abbildung A.3. Bestrahlung des Targets im Versuchsraum 2, während der Nachjustierarbeiten mit einer Hebebühne.

B Anhang: Messreihen

Tabelle B.1. Messreihen A bis C.

Strahler	Justierung [kW/m ²]	Versuchsraum	Cosinus	Nachjustierung [kW/m ²]	Theoretisch [kW/m ²]
A01	182	3	0,66	119	181
A02	146	3	0,67	90	135
A03	179	2	0,63	106	169
A04	188	2	0,62	105	171
A05	147	2	0,66	90	137
A06	137	2	0,67	80	120
A07	195	2	0,64	93	145
A08	195	2	0,58	84	144
A09	151	1	0,66	100	152
A10	162	1	0,67	112	168
A11	90	1	0,64	114	177
B01	183	3	0,76	119	156
B02	182	3	0,78	118	151
B03	170	3	0,78	121	156
B04	173	2	0,71	105	147
B05	163	2	0,76	92	121
B06	175	2	0,78	125	160
B07	189	2	0,78	164	211
B08	156	2	0,74	159	214
B09	142	2	0,68	128	189
B10	171	1	0,78	140	179
B11	89	1	0,78	150	193
B12	104	1	0,75	119	160
C01	188	3	0,86	125	146
C02	199	3	0,87	155	179
C03	215	3	0,85	154	181
C04	180	2	0,83	142	171
C05	180	2	0,86	120	139
C06	203	2	0,87	153	176
C07	209	2	0,86	156	182
C08	213	2	0,81	150	186
C09	166	2	0,73	133	181
C10	124	1	0,87	156	180
C11	91	1	0,85	152	178

Tabelle B.2. Messreihen D bis F.

Strahler	Justierung [kW/m ²]	Versuchsraum	Cosinus	Nachjustierung [kW/m ²]	Theoretisch [kW/m ²]
D01	180	2	0,88	140	158
D02	195	2	0,92	150	164
D03	207	2	0,80	141	176
D04	189	2	0,87	165	190
D05	194	2	0,91	180	198
D06	190	2	0,93	161	174
D07	207	2	0,93	146	158
D08	187	2	0,89	142	159
D09	150	2	0,84	136	162
D10	101	1	0,93	166	179
D11	102	1	0,92	165	178
D12	103	1	0,90	165	183
E01	242	3	0,95	150	158
E02	210	3	0,97	146	151
E03	215	2	0,96	152	158
E04	214	2	0,93	149	159
E05	204	2	0,96	145	151
E06	190	2	0,97	171	177
E07	202	2	0,95	157	165
E08	189	2	0,91	199	218
E09	155	2	0,85	150	176
E10	115	2	0,75	135	179
E11	110	2	0,68	144	211
F01	220	3	0,96	215	225
F02	220	3	0,99	190	193
F03	210	3	0,99	159	161
F04	233	2	0,92	184	199
F05	234	2	0,98	190	195
F06	215	2	0,99	160	161
F07	233	2	0,99	160	162
F08	190	2	0,98	162	166
F09	177	2	0,91	185	203
F10	146	1	0,98	212	216
F11	142	1	0,99	217	219
F12	101	1	0,98	212	216

Tabelle B.3. Messreihen G bis I.

Strahler	Justierung [kW/m ²]	Versuchsraum	Cosinus	Nachjustierung [kW/m ²]	Theoretisch [kW/m ²]
G01	235	3	0,98	172	175
G02	237	3	1.00	172	172
G03	234	2	0,92	173	189
G04	244	2	0,97	190	197
G05	247	2	0,99	210	211
G06	196	2	1.00	165	165
G07	198	2	0,98	144	146
G08	227	2	0,95	194	204
G09	154	1	0,98	210	215
G10	132	1	1.00	160	160
G11	126	1	1.00	159	160
H01	240	3	0,98	209	214
H02	235	3	0,99	208	210
H03	233	3	0,98	178	182
H04	234	2	0,92	165	179
H05	240	2	0,97	203	210
H06	195	2	0,99	152	154
H07	190	2	0,99	166	168
H08	227	2	0,97	199	206
H09	188	2	0,92	151	163
H10	143	1	0,98	176	179
H11	116	1	0,99	171	172
H12	119	1	0,98	231	236
I01	227	3	0,96	171	179
I02	241	3	0,96	180	187
I03	220	3	0,94	167	178
I04	223	2	0,92	195	211
I05	231	2	0,96	197	206
I06	200	2	0,97	168	174
I07	187	2	0,96	186	194
I08	191	2	0,92	191	207
I09	168	1	0,95	169	179
I10	116	1	0,97	202	209
I11	112	1	0,96	200	207

Tabelle B.4. Messreihen J bis L.

Strahler	Justierung [kW/m ²]	Versuchsraum	Cosinus	Nachjustierung [kW/m ²]	Theoretisch [kW/m ²]
J01	185	3	0,91	130	143
J02	205	3	0,92	134	146
J03	224	3	0,91	168	185
J04	227	2	0,82	167	203
J05	219	2	0,90	152	169
J06	200	2	0,92	155	168
J07	197	2	0,92	160	173
J08	219	2	0,90	170	189
J09	180	1	0,89	124	140
J10	112	1	0,92	179	195
J11	91	1	0,93	146	157
J12	88	1	0,91	170	186
K01	210	3	0,85	159	188
K02	220	3	0,85	163	192
K03	219	3	0,83	161	194
K04	225	2	0,79	141	179
K05	210	2	0,84	143	170
K06	180	2	0,86	129	150
K07	167	2	0,85	110	130
K08	187	1	0,79	101	127
K09	155	1	0,84	120	142
K10	125	1	0,86	177	205
K11	93	1	0,86	187	217
L01	207	3	0,75	129	173
L02	215	3	0,76	158	207
L03	218	3	0,75	149	198
L04	202	2	0,67	101	150
L05	188	2	0,73	104	143
L06	156	2	0,77	108	141
L07	169	2	0,78	130	167
L08	204	2	0,77	129	169
L09	160	1	0,73	142	194
L10	130	1	0,77	123	160
L11	125	1	0,78	138	177
L12	81	1	0,77	127	166

Tabelle B.5. Messreihen M.

Strahler	Justierung [kW/m ²]	Versuchsraum	Cosinus	Nachjustierung [kW/m ²]	Theoretisch [kW/m ²]
M01	192	3	0,63	116	184
M02	187	3	0,63	99	156
M03	202	3	0,60	90	149
M04	202	2	0,58	75	130
M05	202	2	0,64	97	152
M06	149	2	0,66	94	142
M07	146	2	0,66	79	121
M08	175	1	0,57	80	142
M09	128	1	0,63	102	162
M10	110	1	0,66	102	154
M11	159	1	0,66	72	109

Tabelle B.6. Stichprobenartige Erstevaluierung im Versuchsraum 3.

Strahler	Justierung [kW/m ²]	Versuchsraum	Cosinus	Nachjustierung [kW/m ²]	Theoretisch [kW/m ²]
A01	182	3	0.61	90	148
A02	146	3	0.63	76	120
A03	179	3	0.63	106	169
C01	188	3	0.84	115	138
C02	199	3	0.86	26	30
C03	215	3	0.85	154	181
D01	180	3	0.88	140	158
D02	195	3	0.92	150	164
D03	207	3	0.92	118	128
E01	242	3	0.95	150	158
E02	210	3	0.97	146	151
E03	215	3	0.96	131	136
F01	220	3	0.96	215	225
F02	220	3	0.99	190	193
G01	235	3	0.98	172	175
G02	237	3	1.00	172	172
G03	234	3	0.99	161	162
H01	240	3	0.96	46	48
H02	235	3	0.99	60	61
H03	233	3	0.99	60	61
I01	227	3	0.95	60	63
K01	210	3	0.84	81	97
M01	192	3	0.61	43	71
M02	187	3	0.63	35	55
M03	202	3	0.63	54	86



Abbildung B.1. Messreihen der fünf Gruppierungen für die Ermittlung der Hauptpeakflussdichte.

C Anhang: Kalibrierungszertifikate

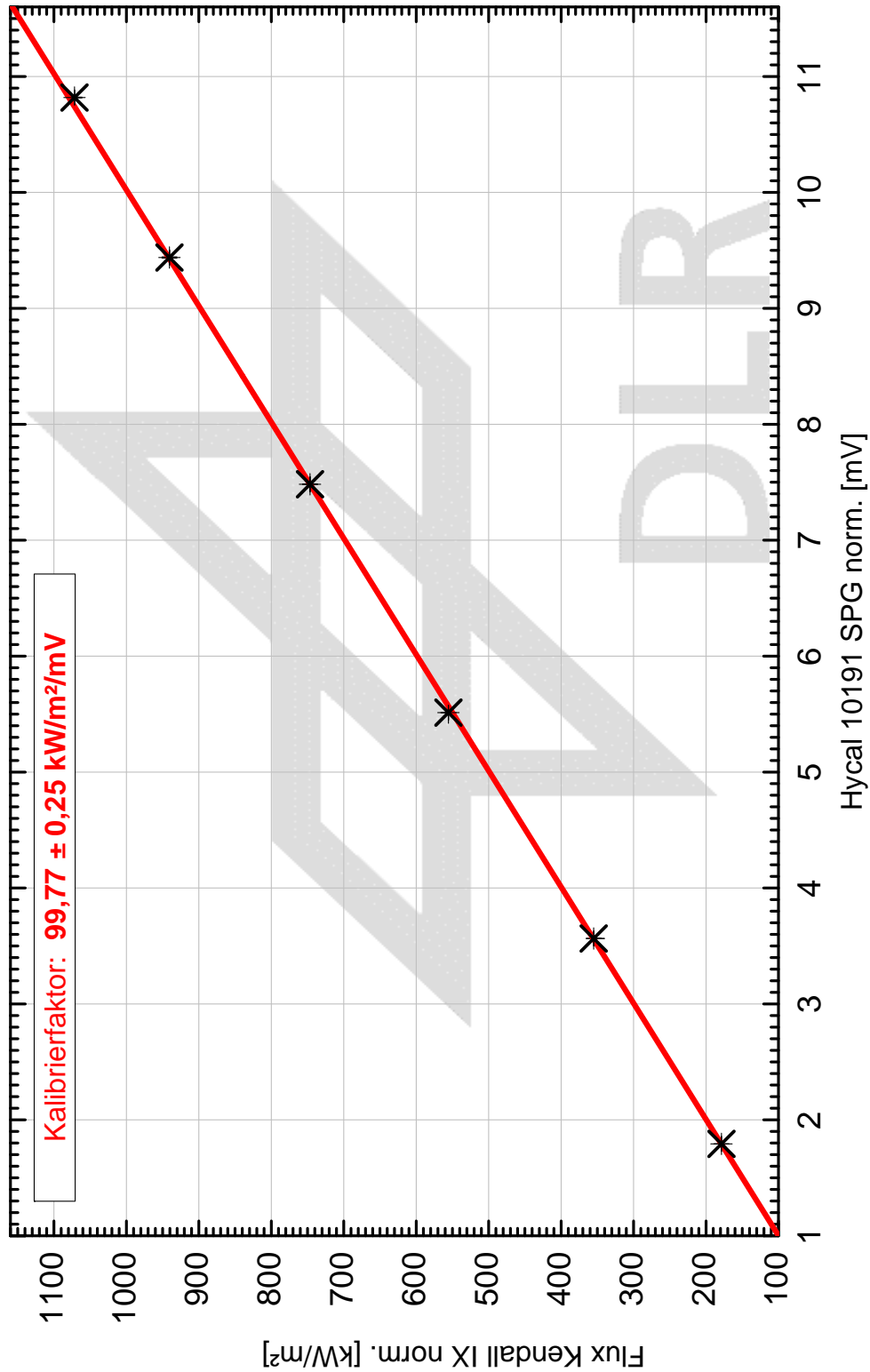


Abbildung C.1. Kalibrierungszertifikat des Radiometers 10191.

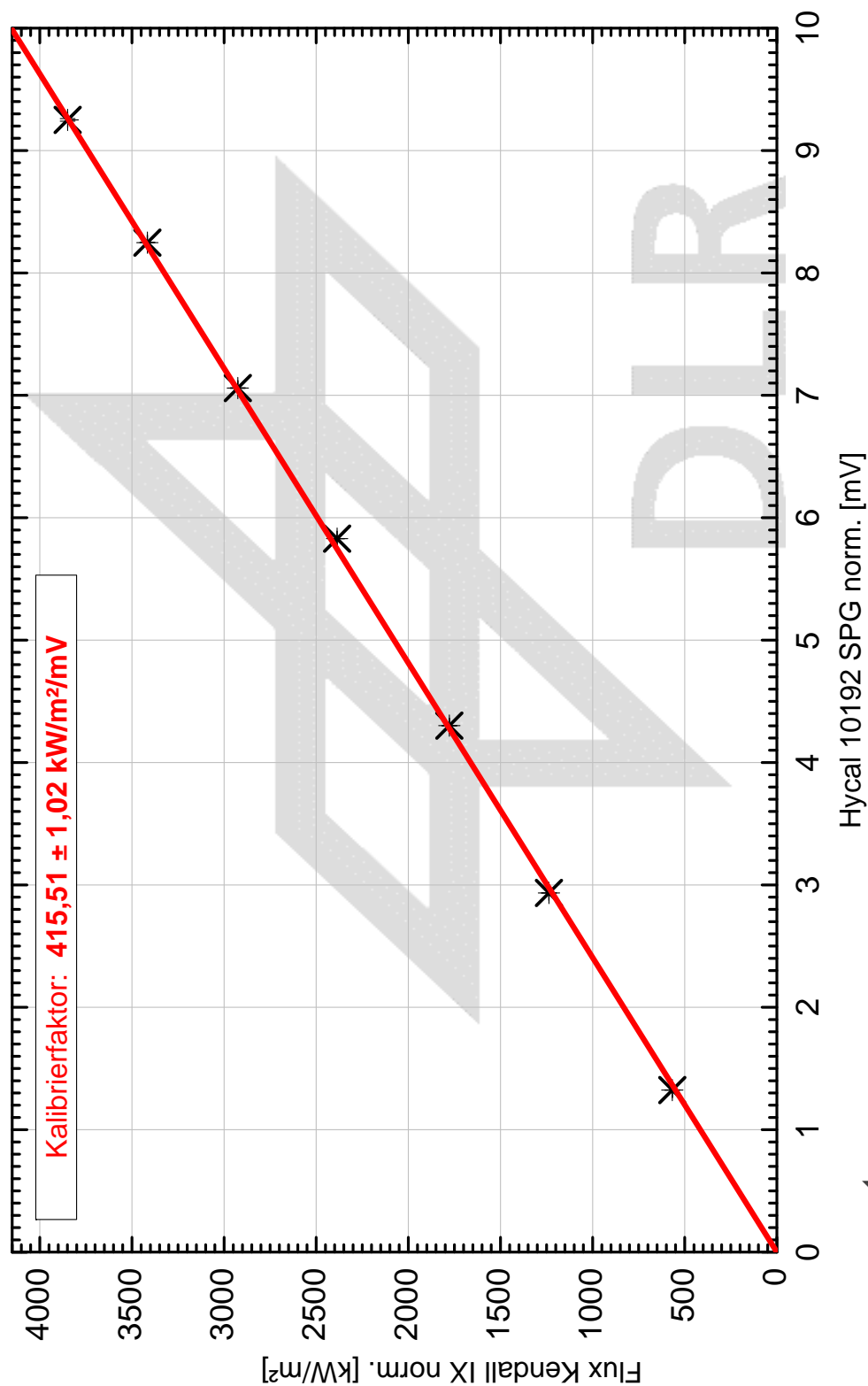


Abbildung C.2. Kalibrierungszertifikat des Radiometers 10192.

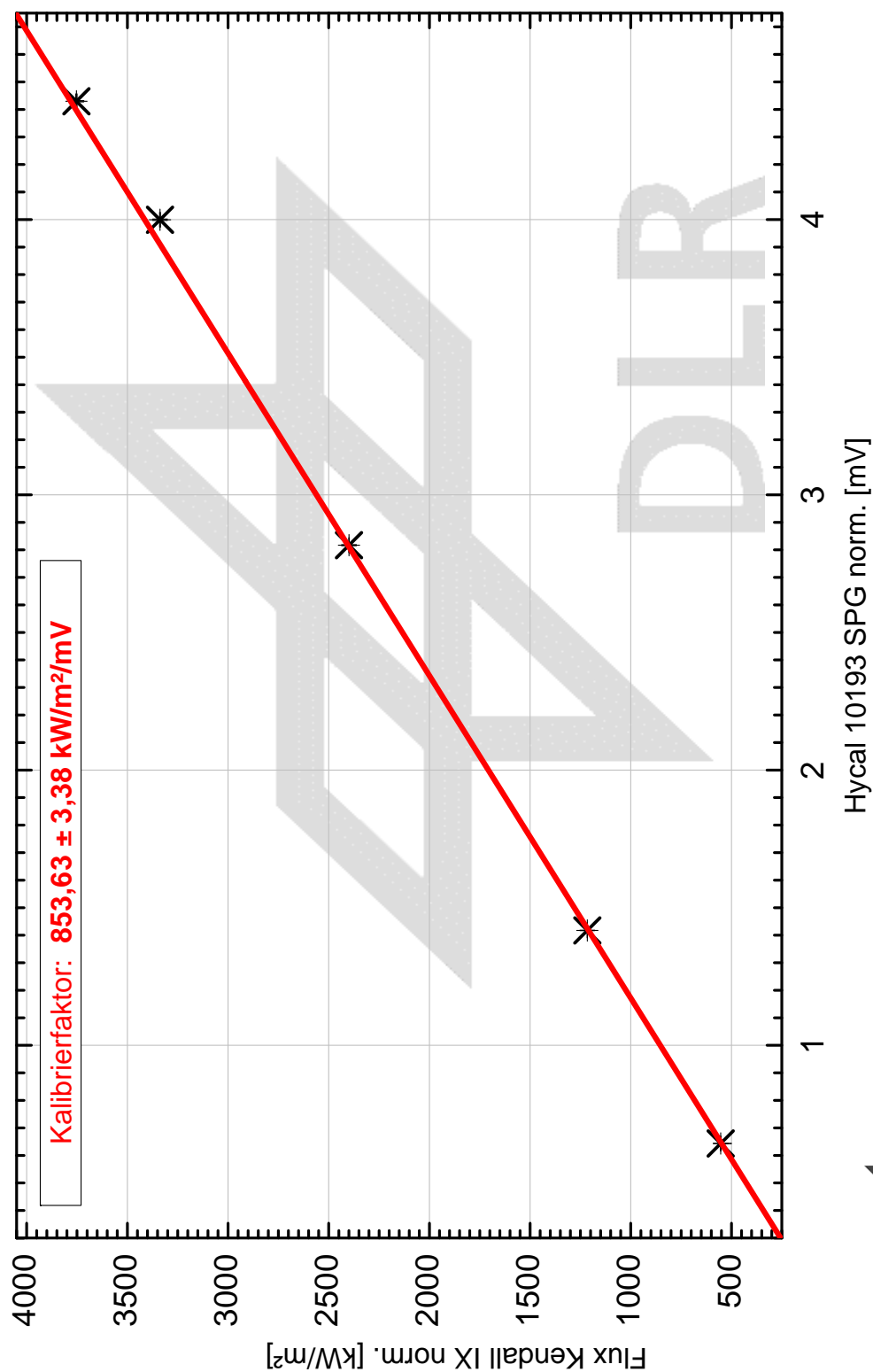


Abbildung C.3. Kalibrierungszertifikat des Radiometers 10193.

D Anhang: MATLAB-Skripte

```
% Diese Textdatei besteht aus 13 Zeilen und aus
% abwechselnd 11 und 12 Spalten.
% Die Werte der Textdatei gehen wie die colormap von 0 bis 1.
% Die Messwerte werden wie folgt zwischen 0 und 1 normiert:
% (Messwert - Minimalwert)/(Maximalwert - Minimalwert)
```

```
UebersichtVor = [dataArray{1:end-1}];  
clearvars filename delimiter formatSpec fileID dataArray ans;
```

```
filename = 'UebersichtVorQ.txt';
delimiter = '\t';
endRow = 1;
formatSpec = '%f%f%f%[^\\n\\r]';
fileID = fopen(filename, 'r');
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, endRow, 'Delimiter',
delimiter, 'ReturnOnError', false);
fclose(fileID);
```

```
l=13; b=12; C=rand(l,b);  
t=(1/(6*2):1/6:1)*2*pi;
```

```
xhex=1.2*cos(t);
yhex=1.2*sin(t);
x = [28 29 29 28];
y = [-4.2 -4.2 -3.2 -3.2];
colormap hot;

for i=1:b
    j=i-1;
    for k=1:l
        m=k-1;
        if isnan(UebersichtVor(k,i))
        else
            if k == 1 || k == 3 || k == 5 || k == 7 || k == 9 || k == 11
                || k == 13
                if i ~= 12
                    patch((xhex+mod(k,2)*1.1)+2.3*j,yhex+2*m,0+UebersichtVor(k,i))
                    % Hexagon
                end
            else
                patch((xhex+mod(k,2)*1.1)+2.3*j,yhex+2*m,0+UebersichtVor(k,i))
                % Hexagon
            end
        end
    end
end
hold on
end
end

axis equal
F=30; h=26;
maxo = ['\leftarrow', num2str(UebersichtVorQ(1,1)), '_kW/m2'];
text(29.5,24,maxo,'FontSize',F)
ocho = ['\leftarrow', ...
num2str(round(0.8*UebersichtVorQ(1,3)+UebersichtVorQ(1,2))), '_kW/m2'];
text(29.5,0.8*24,ocho,'FontSize',F)
seiso = ['\leftarrow', ...
num2str(round(0.6*UebersichtVorQ(1,3)+UebersichtVorQ(1,2))), '_kW/m2'];
text(29.5,0.6*24,seiso,'FontSize',F)
cuatro = ['\leftarrow', ...
num2str(round(0.4*UebersichtVorQ(1,3)+UebersichtVorQ(1,2))), '_kW/m2'];
text(29.5,0.4*24,cuatro,'FontSize',F)
doto = ['\leftarrow', ...
```

```
num2str(round(0.2*UebersichtVorQ(1,3)+UebersichtVorQ(1,2))), '_kW/m2'];
text(29.5,0.2*24,doto,'FontSize',F)
nutto = ['\leftarrow',...
num2str(UebersichtVorQ(1,2)), '_kW/m2'];
text(29.5,0,nutto,'FontSize',F)
```

```
u=2;
```

```
text(-3,24,'A','FontSize',F)
text(-3,24-u,'B','FontSize',F)
text(-3,24-2*u,'C','FontSize',F)
text(-3,24-3*u,'D','FontSize',F)
text(-3,24-4*u,'E','FontSize',F)
text(-3,24-5*u,'F','FontSize',F)
text(-3,24-6*u,'G','FontSize',F)
text(-3,24-7*u,'H','FontSize',F)
text(-3,24-8*u,'I','FontSize',F)
text(-3,24-9*u,'J','FontSize',F)
text(-3,24-10*u,'K','FontSize',F)
text(-3,24-11*u,'L','FontSize',F)
text(-3,24-12*u,'M','FontSize',F)
```

```
v=2.3;
```

```
vv=2.26;
```

```
text(0.6,26.5,'1','FontSize',F)
text(0.6+v,26.5,'2','FontSize',F)
text(0.6+2*v,26.5,'3','FontSize',F)
text(0.6+3*v,26.5,'4','FontSize',F)
text(0.6+4*v,26.5,'5','FontSize',F)
text(0.6+5*v,26.5,'6','FontSize',F)
text(0.6+6*v,26.5,'7','FontSize',F)
text(0.6+7*v,26.5,'8','FontSize',F)
text(0.6+8*v,26.5,'9','FontSize',F)
text(0.6+9*vv,26.5,'10','FontSize',F)
text(0.6+10*vv,26.5,'11','FontSize',F)
```

```
for r=1:h
    patch(x,y+(r+2),1-r/h)
end
axis off
```


D.2 Visualisierung der Flusssdichteverteilung (MATLAB)

```
% HV1 ist in diesem Fall eine Matrix mit 826 Zeilen und 784 Spalten
% HV1Breite ist in diesem Fall ein Vektor mit 784 Spalten
% HV1Hohe ist in diesem Fall ein Vektor mit 826 Zeilen
HV1NaN = zeros(826,784);
for z = 1:826
    for s = 1:784
        if HV1(z,s) == 0
            HV1NaN(z,s) = NaN;
        else
            HV1NaN(z,s) = HV1(z,s);
        end
    end
end
F=35;
DataX = HV1Hohe; DataY = HV1Breite; DataZ = HV1;
rskip = round(linspace(1,826,13));
cskip = round(linspace(1,758,12));
h = surf(HV1Breite,HV1Hohe,HV1NaN-10);
hold on
fufa1 = surf(DataY(:,cskip),HV1Hohe,DataZ(:,cskip),'FaceColor',...
'none','MeshStyle','column');
hold on
fufa2 = surf(HV1Breite,DataX(:,rskip),DataZ(rskip,:), 'FaceColor',...
'none','MeshStyle','row');
colormap hot; colormap(flipud(colormap))
colorbar( 'Ticks',0:2500:15000)
set(fufa1,'LineWidth', 2); set(fufa2,'LineWidth', 2);
set(h,'EdgeColor','none');
set(gca, 'FontSize', F, 'Ytick', 14.8:10:60, 'Xtick', 10:10:55.2,...
'XTickLabel',{ '0','10','20','30','40','','' },...
'YTickLabel',{ '0','10','20','30','40','' }, 'Ztick', 0:5000:15000);
xlim([10 55.2])
ylim([14.8 60])
zlim([0 15000])
set(gca, 'CLim', [0, 15000]);
xlabel( 'Hoehe_und_Breite_[cm]', 'FontSize',33);
zlabel( 'Flusssdichte_[kW/m2]');
```

D.3 Histogramme und Normalverteilungen (MATLAB)

```
% Die Textdatei ist ein vertikaler Vektor mit 149 Zahlen
filename = 'Nach.txt';
delimiter = '';
formatSpec = '%f%[\n\r]';
fileID = fopen(filename, 'r');
dataArray = textscan(fileID, formatSpec, 'Delimiter', delimiter,
'ReturnOnError', false);
fclose(fileID);

Nach = dataArray{:, 1};

clearvars filename delimiter formatSpec fileID dataArray ans;
A=0;B=0;C=0;D=0;E=0;F=0;G=0;H=0;I=0;
WM = 60;
IN = 20;

for i = 1:149
    if Nach(i) >= WM && Nach(i) < WM+IN
        A = (A + 1);
    end
    if Nach(i) >= WM+IN && Nach(i) < WM+IN*2
        B = (B + 1);
    end
    if Nach(i) >= WM+IN*2 && Nach(i) < WM+IN*3
        C = (C + 1);
    end
    if Nach(i) >= WM+IN*3 && Nach(i) < WM+IN*4
        D = (D + 1);
    end
    if Nach(i) >= WM+IN*4 && Nach(i) < WM+IN*5
        E = (E + 1);
    end
    if Nach(i) >= WM+IN*5 && Nach(i) < WM+IN*6
        F = (F + 1);
    end
    if Nach(i) >= WM+IN*6 && Nach(i) < WM+IN*7
        G = (G + 1);
    end
end
```

```
    if Nach(i) >= WM+IN*7 && Nach(i) < WM+IN*8
        H = (H + 1);
    end
    if Nach(i) >= WM+IN*8 && Nach(i) < WM+IN*9
        I = (I + 1);
    end
end
xeta = WM+IN/2:20:WM+IN*8.5;
y = [A B C D E F G H I];
exo = 0:0.001:300;

barNach = bar(xeta,y/149,0.9,'r');
hold on
muNach = median(Nach);
sigmaNach = std(Nach);
NormalVerteilung = normpdf(exo,muNach,sigmaNach);

F = @(x)normpdf(x,muNach,sigmaNach);
FlaecheNormalVerteilung = integral(F,WM,WM+IN*9);
Faktor = 20/FlaecheNormalVerteilung;

plotNach = plot(exo,NormalVerteilung*Faktor, 'k', 'LineWidth', 2);
Schrift=40;
xlim([0 300]);
ylim([0 0.3]);
set(gca,'XTick',min(WM):20:max(WM+IN*9),'XTickLabelRotation',90);
set(gca,'YTick',0:0.1:0.3);
set(gca,'FontSize', Schrift);
xlabel('Flussdichte_[kW/m2]');
ylabel('Relative_Haeufigkeit_[_ _]');

legend([barNach], {'Nachjustierung'}, 'Location','northeast')
```

Literaturverzeichnis

- [1] Wieghardt, Kai; Laaber, Dmitrij; Hilger, Patrick; Dohmen, Volkmar; Funken, Karl-Heinz; Hoffschmidt, Bernhard: „Engineering and Erection of a 300 kW High-Flux Solar Simulator“, Paper, 2016
- [2] Dibowski, Gerd; Neumann, Andreas; Rietbrock, Peter; Willsch, Christian; Säck, Jan-Peter; Funken, Karl-Heinz: „Der neue Hochleistungsstrahler des DLR - Grundlagen, Technik, Anwendung“, Paper, 2007
- [3] Dibowski, Gerd: „Hochflusssdichte-Sonnenofen und Xenon-Hochleistungsstrahler Köln“, http://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-10953/19318_read-44891/ abgerufen am 06.04.2017
- [4] IREM: „EX Series - Electronic power supplies for short arc xenon lamps“, technisches Datenblatt, 2017
- [5] Roeb, Martin: „Solarthermische Wasserstoffherstellung mit Hilfe von Metalloxidzyklen“, http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/soko/soko2017/presentationen/DLR-Sonnenkolloquium2017_Wasserstoff_Metalloxidzyklen_-_Martin_Roeb.pdf abgerufen am 06.07.2017
- [6] Ulmer, Steffen: „Messung der Strahlungsflusssdichte-Verteilung von punktkonzentrierenden solarthermischen Kraftwerken“, Dissertation, Institut für Technische Thermodynamik des DLR und Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart, 2003
- [7] User - Sch: „Spektrale Verteilung der Intensität der Schwarzkörperstrahlung bei unterschiedlichen Temperaturen des schwarzen Strahlers“, https://de.wikipedia.org/wiki/Schwarzer_K%C3%B6rper#/media/File:BlackbodySpectrum_loglog_150dpi_de.png abgerufen am 06.07.2017
- [8] Plank, Max: „Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum“, Annalen der Physik. Band 309, Nr. 3, physikalische Fachzeitschrift, 1901
- [9] Fundamental Physical Constants: „Stefan-Boltzmann constant“, <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma> abgerufen am 28.03.2017
- [10] Williams, David: „Sun Fact Sheet“, NASA Goddard Space Flight Center,

2016

- [11] Fundamental Physical Constants: „Speed of light in vacuum“, <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c>
abgerufen am 28.03.2017
- [12] Quaschnig, Volker: „Regenerative Energiesysteme; Technologie - Berechnung - Simulation“, Carl Hanser Verlag München, 2015
- [13] Mertens, Konrad: „Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen Technologie und Praxis“, Hanser Fachbuchverlag, 2015
- [14] La Roche, Günther: „Solargeneratoren für die Raumfahrt; Grundlagen der photovoltaischen Solargeneratortechnik für Raumfahrtanwendungen“, Springer Verlag, 2016
- [15] Lambert, Johann Heinrich; Anding, Ernst: „Lamberts Photometrie: 1. Th. Das directe Licht. - 2. Th. Die Schwächung des Lichts durch durchsichtige Körper, besonders durch Glas“, Wilhelm Engelmann, 1892
- [16] Stroppe, Heribert: „Physik für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften“, Carl Hanser Verlag, 2015
- [17] Lompe, Arved: „Technisch-wissenschaftliche Abhandlungen der Osram-Gesellschaft: Band 11“, Springer Verlag, 2013
- [18] Scherl, August: „Das große Buch der Technik“, Bertelsmann-Lexikon-Verlag, Gütersloh, Wien 1970
- [19] Osram GmbH: „XBO® – Theater Lamps; Technology and application“, technisches Datenblatt, 2016
- [20] Papula, Lothar: „Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Band 1“, Springer Vieweg, 2009
- [21] Thelen, Martin: „Entwicklung eines optischen Messsystems für Strahlungsflussdichteverteilung und Verifizierung anhand hochkonzentrierter Solarstrahlung“, Masterarbeit, Rheinische Fachhochschule Köln und DLR, 2016
- [22] Vatel Corporation: „About Us and the Thermogage Circular Foil Heat Flux Gauges“, <http://www.vatell.com/node/2> abgerufen am 17.07.2017
- [23] Gardon, Robert: „An Instrument For Direct Measurement Of Intense Thermal Radiation“, The Review Of Scientific Instruments, 1953
- [24] Vatel Corporation: „Use of the Thermogage Circular Foil Heat Flux Gauge“,

technisches Datenblatt, 2017

- [25] ASTM International: „Standard Test Method for Measuring Heat Flux Using a Copper-Constantan Circular Foil, Heat-Flux Transducer“, ASTM Designation E511-07, 2015
- [26] Kendal, J.M.; Berdahl, C.M.: „Two Blackbody Radiometers of High Accuracy, Vol. 9, Issue 5, pp. 1082-1091“, Paper, 1970
- [27] Wieghardt, Kai; Laaber, Dmitrij; Dohmen, Volkmar; Hilger, Patrick; Korber, Daniel; Funken, Karl-Heinz; Hoffschmidt, Bernhard: „Synlight - A new Facility for Large-Scale Testing in CSP and Solar Chemistry“, Paper, 2017
- [28] Coventry, Joseph; Pye, John; Andraka, Charles E.; Blanco Muriel, Manuel; Fisher, James: „Sodium receivers for solar power towers: a review“, Paper, 2014
- [29] Wittenberg, Benjamin: „Entwicklung und Inbetriebnahme eines Messsystems zur Bestimmung der Flussdichteverteilung und konzentrierter Solarstrahlung“, Masterarbeit, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg und DLR, 2014
- [30] Römisch, Johannes: „Entwicklung der Positionierung eines Strahler-Moduls für den Solarsimulator SynLight“, Bachelorarbeit, Technische Hochschule Köln und DLR, 2015
- [31] Löffler-Mang, Martin: „Optische Sensorik: Lasertechnik, Experimente, Light Barriers“, Springer Verlag, 2011
- [32] Basler: „Spezifikationen der Kamera Pilot piA1000-48gm“, technisches Datenblatt, <https://www.baslerweb.com/de/produkte/kameras/flaechenkameras/pilot/pia1000-48gm/> abgerufen am 02.06.2017
- [33] ON Semiconductor®, „1000 (H) x 1000 (V) Interline CCD Image Sensor“, technisches Datenblatt, 2017
- [34] MathWorks: „Normal probability density function“, <https://de.mathworks.com/help/stats/normpdf.html> abgerufen am 24.07.2017
- [35] MathWorks: „Standard deviation“, <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/std.html> abgerufen am 24.07.2017